فصل دوم: طبقه بندی ژنتیکی کانسارهای مس

۱-۲ مقدمه

بشر تنها قادر به تصمیم گیری در مورد استخراج یا صرف نظر از استخراج یک ماده معدنی است و این طبیعت است که در مورد زمان و مکان تشکیل ماده معدنی تصمیم می گیرد. بر این اساس، خاستگاه زمین شناختی مشخص، اساس تقسیم بندی ژنتیکی کانسارهاست. مهمترین کانسارهای مس به پنج گروه تقسیم می شوند[61].

۱- کانسارهای مس پورفیری (همراه با کانسارهای رگه ای و اسکارنی).

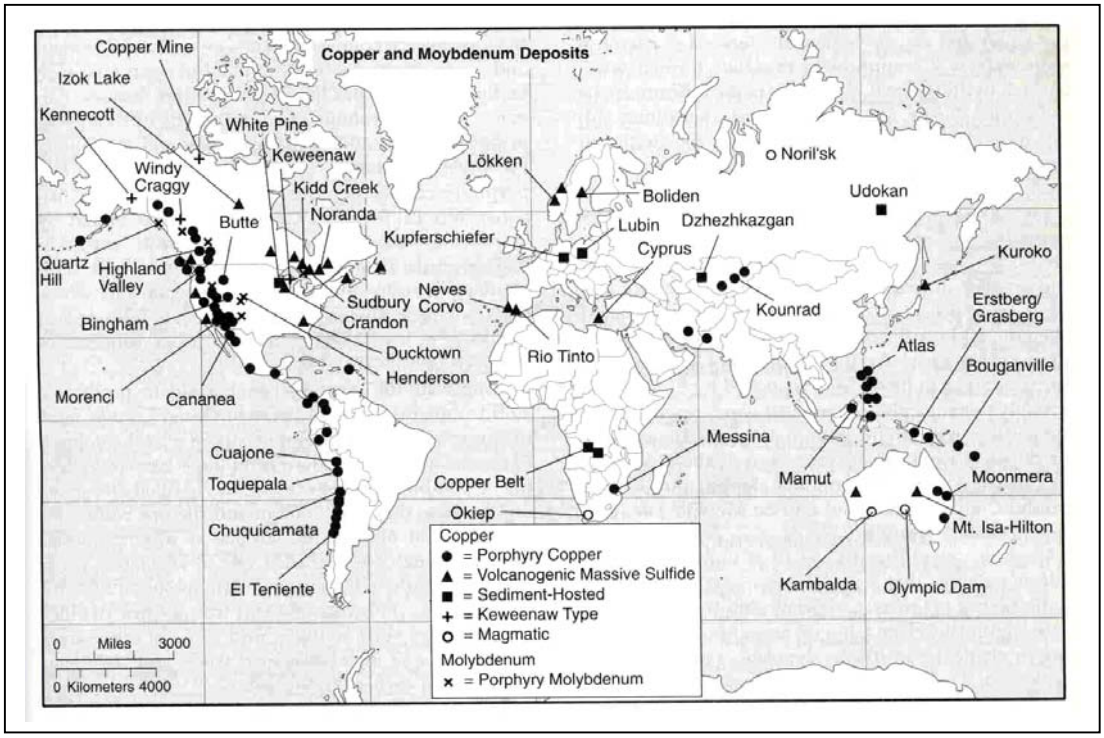
۲- کانسارهای مس با سنگ میزبان رسوبی.

۳- کانسارهای مس ماگماتیکی.

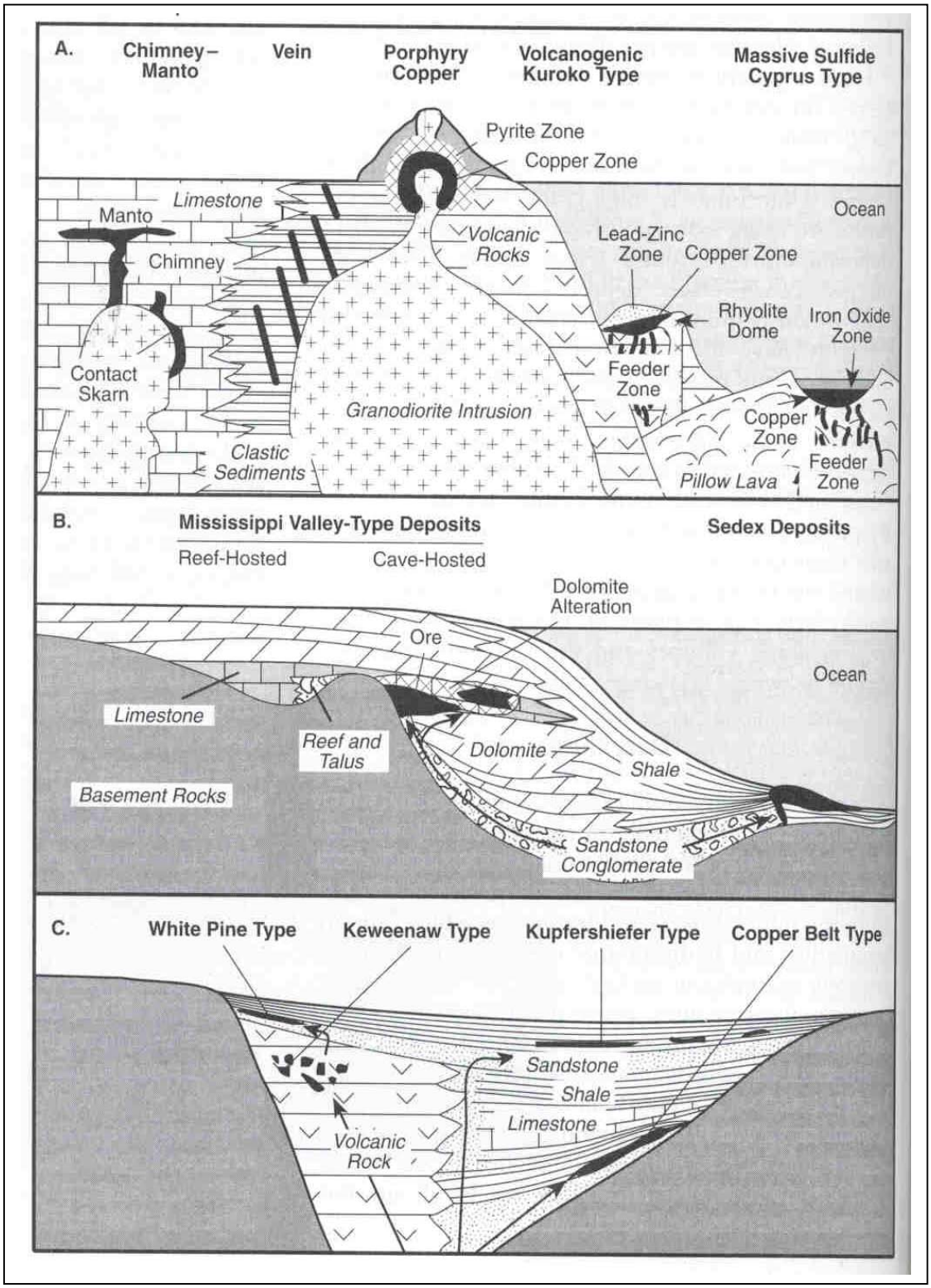
۴- کانسارهای مس تیپ کویناو یا تیپ میشیگان.

۵- کانسارهای مس تیپ سولفید توده ای ولکانوژنیک.

این کانسارها از نظر محیط تشکیل زمینساختی، نوع سنگ در برگیرنده، هندسهٔ مادهٔ معدنی و سنگ دربرگیرنده، پاراژنزها، نحوهٔ تشکیل، عیار، ذخیره و غیره با هم متفاوتند(شکل ۱-۱-۲ و ۲-۱-۲).



شکل ۱-۱-۲ موقعیت مهمترین کانسارهای مس و مولیبدن در جهان؛ همه کانسارهای معرفی شده در این نقشه معدنکاری نشده اند. به تمرکز و نحوه قرارگیری نهشته های مس پورفیری در محدوده پهنه فرورانش حاشیه ورقه اقیانوس آرام دقت شود[61].



شکل۲-۱-۲ جایگاه زمین شناختی و ویژگیهای محیط تشکیل تیپ‌های مهم کانسارهای گروه فلزات پایه (مس، سرب و روی، قلع)[61]

۲-۲ کانسارهای مس پورفیری

۱-۲-۲ معرفی:

مهمتریـن کانسـارها، از نـوع نهشته های هیدروترمالی، کانسار مس پورفیری است که در اطراف توده های نفوذی تغذیه کننده آتشفشان ها یافت می شود(جدول۱-۱-۲-۲). این نهشته های متشکل از رگچه های متقاطع یـا اسـتوک ورک، شـامل کوارتـز، کالکوپیریـت و دیگـر کانی ها بوده که در اطراف نفوذی های فلسیک یافت مـی شـوند(شـکل ۱-۱-۲-۲). نحـوه شکل گیری آنها به این ترتیب است که هنگامی که محلول های ماگمایی نشـات گرفـته از تـوده هـای نفوذی سرد و کریستاله می شوند، سنگ های محیط اطراف خود را خرد می کنند. فضای ایجاد شده محیط مناسبی برای نهشت کانسارهای مس می باشد[61].

شکل ۱-۱-۲-۲ رگچه های متقاطع از کوارتز، پیریت و کالکوپیریت در کانسار مس پورفیری گرانسیل (Granisle) در بریتیش کلمبیا[61].

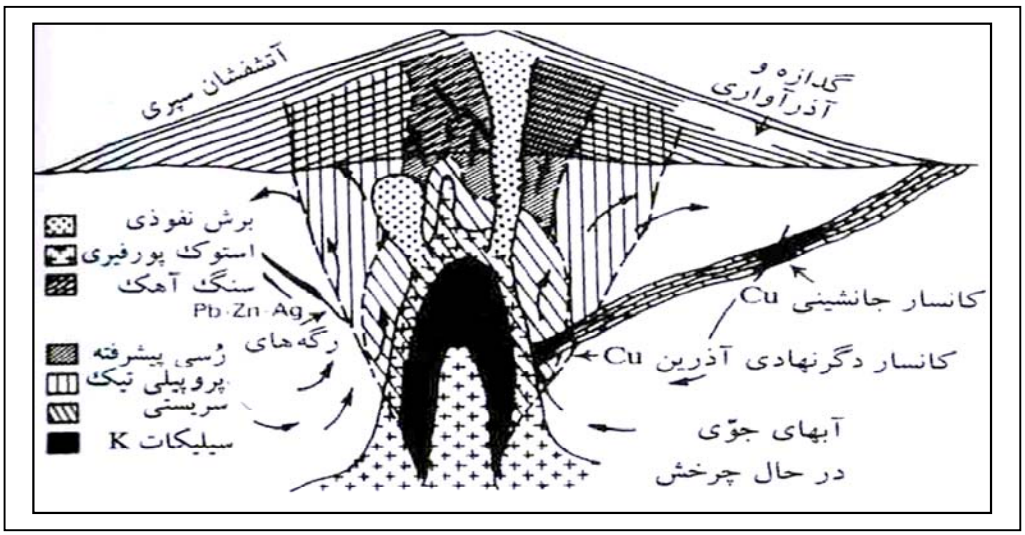
جدول۲-۱-۱-۱): خصوصیات مربوط به سه نوع کانسار مس پورفیری، نقل از [۲۳]

	مرتبط با استوک	آتشفشانی		پلوتونی
		الف) کالک آلکالیک	ب) آلکالیک	
موقعیت	همراه با استوک های بعد از کوهزایی که به داخل سنگهای غیرمرتبط جایگزین شده اند.	در سنگهای بازی تا حدواسط که به درون آنها توده های نفوذی کالک آلکالیک (دیوریت) و یا آلکالیک (شوشونیت) جایگزین شده است.		در توده های نفوذی کالک آلکالیک که در داخل و یا نزدیکی سنگهای آتشفشانی ولبسف جایگزین شده است.
توده نفوذی	توده های استوکه ای کوچک (۰.۵ تا ۲ کیلومتر مربع) با بافت پورفیری، همراه با دایک های پورفیری جایگزین شده قبل، همزمان و بعد از کانسارسازی	ورقه ها، دایکها و پلاگهای کوچک تا بسیار کوچک که در محیط نیمه آتشفشانی جایگزین می شوند	ورقه ها، دایکها و پلاگهایی که در عمق جایگزین می شوند و در ارتباط با توده های عمق متوسط هستند	توده های باتولیتی (< ۱۰۰ کیلومتر مربع) که در اعماق زیاد جایگزین شده اند (۳ تا ۴ کیلومتر) همراه با دایکهای پورفیری
کنترل ساختمانی در جایگزینی توده های نفوذی	جایگزینی به آرامی صورت می گیرد، بسیاری از استوکها در محل برخورد گسلهای ناحیه ای جایگزین می شوند.	جایگزینی در دهانه های آتشفشانی، منطقه گسله و بصورت دایکهای شعاعی انجام می شود	جایگزینی توسط ساختمانهای منطقه ای کنترل می شود. توده های نفوذی مربوط به عمق کم در دهانه های آتشفشانی و مناطق گسله جایگزین می شوند.	جایگزینی به صورت گنبد انجام می شود.
دگرسانی	دگرسانی پتاسیک، فیلیک و پروپیلی تیک بصورت حلقوی توسعه می یابند و توسعهٔ دگرسانی رسی در کانسارهای مختلف، متفاوت است.	پتاسیک±رسی، فیلیک، پروپیلی تیک	پتاسیک، پروپیلی تیک و ندرتا اسکارپولیت	فیلیک، رسی، پروپیلی تیک و بطور ناحیه ای پتاسیک
توده های معدنی	بصورت غشاء و یا کلاهک در حاشیه و یا در اطراف توده نفوذی، دارای ساخت منطقه ای جانبی، بخش مرکزی فاقد کانسارسازی و بطرف خارج به ترتیب مناطق حاوی مولیبدنیت، کالکوپیریت و نهایتا پیریت واقع می باشند.	شامل کانسارهای مس ـ مولیبدن پورفیری است، توده معدنی عدسی شکل است	کانسارهای مس ـ مولیبدن پورفیری در نفوذیهای برشی و یا سنگهای دیواره ای خرد شده، بطور موضعی حاوی سنگ معدن مگنتیت ـ آپاتیت ماگمایی	رگچه های دار بستی با دیواره های نامشخص

این ذخایر، کانسارهای استوک ورک تا افشان بزرگ و عیار پایین مس هستند که ممکن است حاوی مقادیر ناچیز اما قابل بازیافت مولیبدن، طلا و نقره نیز باشند. این ذخایر معمولاً کانسارهای مس ـ مولیبدن یا مس ـ طلا یا هرسه هستند. ارزش این کانسارها تابعی از روش های معدنکاری حجیم اعم از روباز و یا در صورت زیرزمینی بودن، استخراج بلوکی (block caving) است. استخراج انتخابی در این معادن امری ناممکن است و سنگ میزبان استوک ورک و کانه زایی افشان باید یک جا استخراج شود و از این راه برخی از بزرگترین حفره های ساخت بشر در پوسته زمین ایجاد شده است. بیشتر این کانسارها دارای ۰/۴ تا ۱ درصد مس و ذخیره ای تا ۱۰۰۰ میلیون تن هستند. حتی چند ذخیره غول پیکر، ذخیره ای بیش از این نیز دارند.

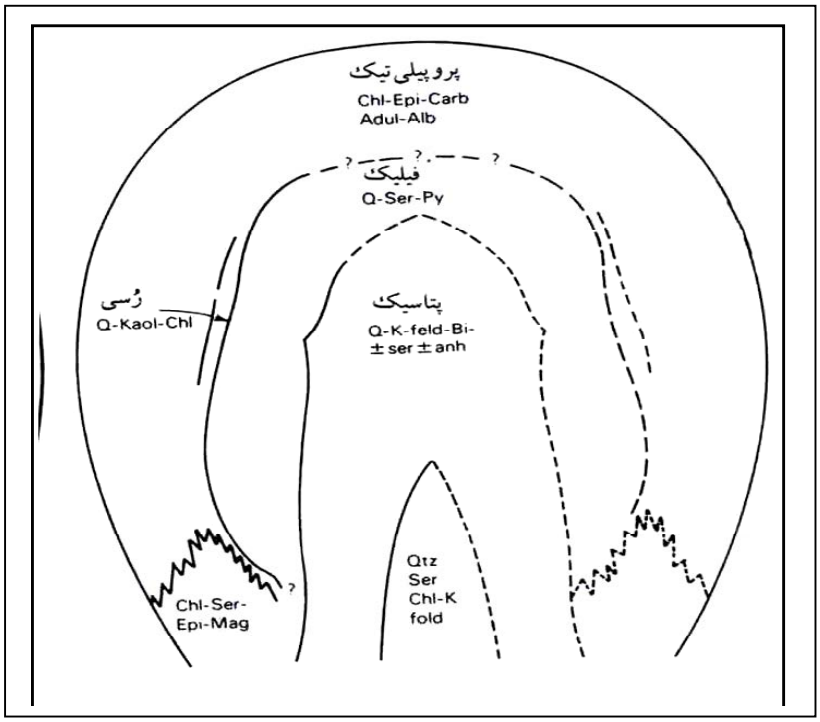
یک کانسار تیپیک مس پورفیری، توده نفوذی مرکب، استوانه ای و استوک مانندی است که رخنمونی کشیده یا نامنظم با ابعادی حدود ۲ × ۱/۵ کیلومتر دارد و اغلب، سنگ هایی متوسط دانه با بافتی همسان دانه (Equigranular) آن را در بر می گیرد. بخش مرکزی توده نفوذی که بخش پورفیری آن است، دارای بافت پورفیری است (که بر یک دوره سردشدگی سریع که منجر به تشکیل زمینه ریزدانه در سنگ می شود اشاره دارد). این کانسارها از دهۀ ۱۹۲۰ به این نام موسوم شدند و تا قبل از سال ۱۹۰۵ هیچکدام از کانسارهای با ارزش مس این تیپ مورد استخراج قرار نمی گرفتند. اهمیت یافتن این کانسارها مرهون پیشرفت در فن آوری استخراج و تغلیظ مواد معدنی است. اولین کانسار مس پورفیری که برای اولین بار بعنوان کانسار عیار پایین ۲٪ ـ ۱٪ مس مورد استخراج قرار گرفت، کانسار بینگهام در یوتای آمریکاست. تینلی و هیکس کانسارهای مس پورفیری را اینگونه تعریف کرده اند: واژۀ مس پورفیری به کانسارهایی اطلاق می شود که دارای ذخیره بالا ـ عیار پایین، غیر همزاد و درونزاد باشد و از طریق روش های معدنکاری بزرگ قابل استخراج باشد[۲۴].

در اطراف بسیاری از کانسارهای مس پورفیری، رگه هایی که حاوی کانی سازی سرب، روی، منگنز، نقره و طـلا اسـت، وجـود دارد(شـکل ۲-۱-۲-۲). محصول فرعی کانسارهای مس پورفیری، مولیبدن است. کانه های اصلی آن کالکوپیریت و مولیبدنیت است. هر چند مولیبدنیت و کالکوپیریت در کانسارهای مس پورفیری وجود دارد، ولی بین کانسارهای مس پورفیری و مولیبدن پورفیری طیفی پیوسته وجود ندارد.



شکل ۲-۱-۲-۲ نمایشی ترسیمی از یک سیستم پورفیری. به ارتباط کانسارهای اسکارن جانشینی و رگه ای گرمابی توجه شود[۲٤].

ایـن کانسـارها بـه سیستم های گرمابی توده های نفوذی مرتبط هستند. یکی از ویژگی های این کانسارها، سـاخت مـنطقه ای سـولفیدی ـ سیلیکاتی است که توسط لاول و گیلبرت(Lowell-Guilbert Model) در سال ۱۹۷۰ بعد از مقایسهٔ کانسار کالامازو(آریزونا) با ۲۷ کانسار مس پورفیری دیگر دنیا ارائه گردید[۲۴].

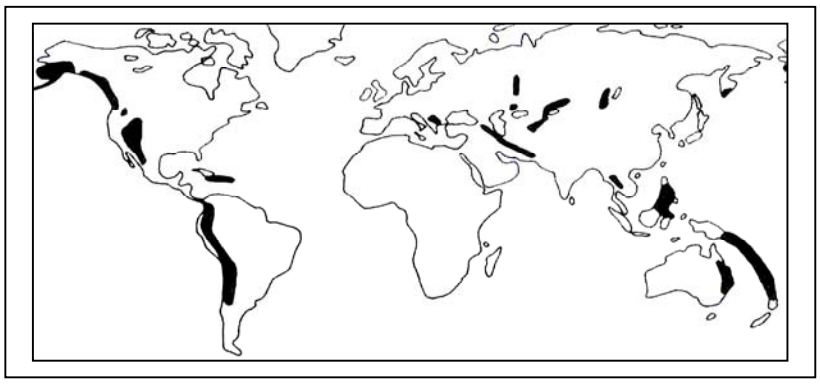


شکل ۳-۱-۲-۲ ساخت منطقه ای در دگرسانی های موجود در یک کانسار مس پورفیری[۲۴]

دگرسانی در این کانسارها از داخل به خارج به ترتیب زیر است (شکل ۳-۱-۲-۲)

پتاسیک ـــــــ فیلیک ـــــــ رسی ـــــــ پروپلیتی

کانسـارهای مـس پورفـیری از نقطـه نظـر زمینسـاختی در حاشـیه هـای قـاره ای فعـال و جزایـر قوسی یافت مـی شـود(شـکل ۴-۱-۲-۲). بعضی این کانسارها را به دو ردهٔ مس ـ مولیبدن و مس ـ طلا تقسیم می کنند که همیشه صادق نیست. بطور کلی کانسارهای مس ـ طلا در جزایر قوسی و کانسارهای مس ـ مولیبدن در حاشیهٔ قاره ها قرار می گیرند.



شکل ۴-۱-۲-۲ پراکندگی ایالت های مس پورفیری در جهان[۲۴]

۲-۲-۲ پتروگرافی و ماهیت توده ها ی نفوذی میزبان

رایـج ترین سنگ های میزبان این ذخایر، سنگ های آذرین درونی اسیدی از خانواده گرانیت با ترکیبی از گرانیـت بـه سـمت گرانودیوریت تا تونالیت، کوارتز مونزودیوریت و دیوریت است. در هر حال سنگ هایی با ترکیب دیوریت تا مونزونیت (بویژه کوارتز ـ مونزونیت) تا سینیت (گاه آلکالی سینیت) نیز از سنگ های میزبان مهـم محسـوب مـی شـوند. بسیاری از مؤلفان بر این باورند که ذخایر مس پورفیری معمولاً دارای سنگ میزبان گرانیتویـیدی از نـوع I هستند که در میان این گروه از سنگ ها، تمیز دادن توده های نفوذی I کوردیلرا از نوع I کالدونـی اهمیت دارد؛ چرا که در نوع دوم به ندرت کانه سازی اقتصادی مشاهده می شود. در توده های نفوذی مـیزبان واقـع در خاسـتگاه هـای جزایـر کمانی، نسبت ایزوتوپی اولیه استرونسیم آغازین، بین ۰/۷۰۵ تا ۰/۷۰۲ متغـیر اسـت و بـه ظاهـر از گوشـته بالایـی یـا پوسـته اقیانوسی بازیابی شده، تامین شده است. بالاتر بودن این نسـبت ها در توده های نفوذی مینرالیزه واقع در خاستگاه های قاره ای، اغلب دلالت بر ناشی شدن آنها از مواد پوسـته ای و یـا بـه احتمال قوی تر آلودگی این سنگ ها توسط مواد پوسته ای دارد. وجود وقایع مکرر نفوذی (Multiple Intrusive Events) در مـناطق دارای کانـه زایـی مـس پورفـیری امری عادی می باشد و توده های مـیزبان کانـه زایـی معمولاً جوان ترین توده بوده و بیشترین تفکیک را از خود بروز می دهند. توده های نفوذی مـیزبان بیشتر به آرامی در بخش های بالاتر پوسته مستقر می شود، تا از راه ایجاد فشار و کنار زدن سنگ ها. در ایـن مـیان فرایـندهای هضـم(Assimilation) و استوپینگ(Stopping)، سازوکارهای اساسی به شمار می روند. سـنگ مـیزبان هـای اقتصـادی ممکـن است استوک های منفرد یا یک واحد مرحله پسین از یک توده ماگمایی مرکب همزمان با فعالیت ماگمایی، بیشتر با ابعادی در حد باتولیت باشد[۸].

۲-۲-۳ دگر سانی گرمابی

در سال ۱۹۷۰، لاول و گیلبرت، تودۀ معدنی سان مانوئل ـ کلامازو(آریزونا) (San Manuel, Kalamazoo Orebody) را توصـیف و یافـته هـای خویـش را بـا ۲۷ کانسار مس پورفیری دیگر مقایسه کردند. با انجام این مطالعـه، آنچه که اکنون به عنوان مدل لاول ـ گیلبرت شناخته می شود، ارائه شد. آنها در این تحقیق ارزشمند و بنـیادی نشـان دادند که بهترین چهارچوب مرجعی که می تواند تمام سیماهای دیگر این ذخایر را به هم ارتباط دهـد، ماهیت و توزیع مناطق دگر سانی گرمابی سنگ دیواره است. بر اساس ادعای آنها همان گونه که در شکل ۳-۱-۲-۲ مشـاهده مـی شـود عمومـاً چهـار مـنطقه دگرسـانی وجود دارد. این مناطق بیشتر در اطراف استوک پورفیری به صورت مناطق هم محوری که پوسته هایی هم مرکز و اغلب ناکامل را می سازند متمرکز می شود و غالـباً در اکتشـاف ذخایـر مـس پورفیری به عنوان یک راهنما مورد استفاده قرار می‌گیرد[۸]. این مناطق در مدل لاول ـ گیلبرت عبارت است از:

(الـف) منطقه پتاسیک(Potassic zone): این منطقه همیشه و جود ندارد و در صورت وجود با تشکیل ارتوکلاز و بیوتیـت ثانویـه، یـا تشـکیل ارتوکـلاز ـ بیوتیت ـ کلریت شناسایی می شود. سریسیت نیز ممکن است وجود داشته باشد. این کانی های ثانویه، جانشین ارتوکلاز، پلاژیوکلاز و کانی های مافیک اولیه توده نفوذی می شوند. انیدریت ممکن است در این منطقه غالب باشد.

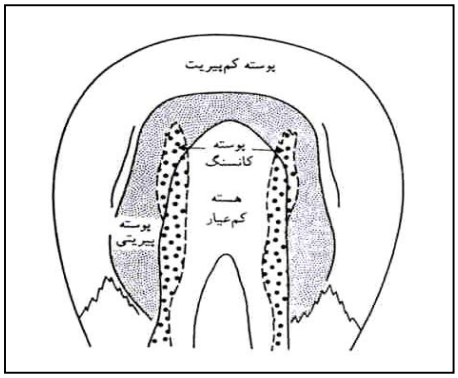
(ب) منطقه فیلیک(Phyllic zone): نوعی دگرسانی است که در ذخایر دیگر به عنوان سریسیتی شدن و دگرسانی آرژیلیک پیشرفته شناخته می شود. این منطقه از روی وجود مجموعه کوارتز ـ سریسیت ـ پیریت مشخص می شود و معمولاً دارای مقادیر کمی کلریت، ایلیت و روتیل است. سریستی شدن برفلدسپارها و بیوتیت اولیه تاثیر می گذارد و دگر سانی بیوتیت، مقدار ناچیزی روتیل تولید می‌کند. این دگرسانی ها واکنش هایی سیلیس زا هستند و به همین دلیل مقدار زیادی کوارتز تشکیل می شود(سیلیسی شدن). سطح تماس این منطقه با منطقه پتاسیک، سطح تماسی تدریجی با ضخامت بیش از ده ها متر است. منطقه فیلیک در صورت وجود، دارای بیشترین توسعه پیریت افشان و رگچه ای است.

(ج) منطقه آرژیلیک(Argillic zone): این منطقه همیشه وجود ندارد. کانی های رسی، ویژگی این منطقه بوده و همراه با کائولن با نزدیکتر شدن به تودهٔ معدنی فراوان شده و با دور شدن از آن مونتموریونیت افزایش می‌یابد.

(د) منطقه پروپیلیتیک(Propylitic zone): این منطقه که خارجی ترین منطقه است، همواره وجود دارد. کلریت رایج ترین کانی این منطقه است. پیریت، کلسیت و اپیدوت نیز با آن همراه است. کانی های مافیک اولیه (بیوتیت و هورنبلند) به طور بخشی یا کامل به کلریت و کربنات تبدیل می شود و پلاژیوکلاز ممکن است بدون تغییر باقی بماند. این منطقه در طول صدها متر به سمت سنگ های احاطه کننده آن، محو می شود.

۴-۲-۲ کانه زایی هیپوژن (Hypogene mineralization)

کانسنگ ممکن است در سه وضعیت متفاوت یافت شود: ۱) تماماً در میان استوک میزبان ۲) بخشی در استوک و بخشی در سنگ دیواره ۳) فقط در سنگ دیواره. در نمونه هایی که به وسیله لاول و گیلبرت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته، معمولی ترین شکل تودهٔ معدنی، شکل استوانه ای با دیواره هایی پر شیب است. شکل های استوانه ای کوتاه تا مخروطی تخت و شکل های تخت کم شیب نیز یافت می شود(شکل۱-۴-۲-۲). توده های معدنی معمولاً به وسیله پوسته ای سرشار از پیریت احاطه می شود. کانه زایی همانند دگر سانی، در مناطقی هم مرکز یافت می شود. در این میان منطقه ای سترون یا کم عیار در بخش مرکزی قرار می گیرد که دارای مقادیر ناچیزی کلکوپیریت و مولیبدنیت است. پیریت معولاً فقط در صد کمی از سنگ را می سازد، اما گاه به طور اتفاقی به ۱۰ درصد هم می رسد. درگذر به سمت بخش های بیرونی، نخست افزایشی در مولیبدنیت و سپس در کلکوپیریت در پوسته معدنی اصلی به چشم می خورد[۸].



شکل۱- ۴-۲-۲ تصویر شماتیک از مناطق اصلی کانه زایی سولفیدی در مدل لاول ـ گیلبرت برای ذخایر مس پورفیری. خطوط پیوسته، مرز مناطق دگرسانی نشان داده شده در شکل را مشخص می کند[۸].

همچنین شدت کانه سازی پیریت به سمت بخش های بیرونی افزایش یافته و هاله حاشیه ای سرشار از پیریت با ۱۰ تا ۱۵ درصد پیریت و فقط مقادیر ناچیزی کلکوپیریت و مولیبدنیت را می سازد. پوسته ها دارای رابطه ای مکانی با مناطق دگرسانی سنگ دیواره بوده و بالاترین مقادیر مس اغلب در مرز میان زون های پتاسیک و فیلیک یا نزدیک آن تشکیل شده است. کانه زایی ضعیف غیر اقتصادی به سمت بیرون به طرف منطقه پروپیلیتیک ادامه می‌یابد.

۲-۲-۵ مدل دیوریت (Diorite model)

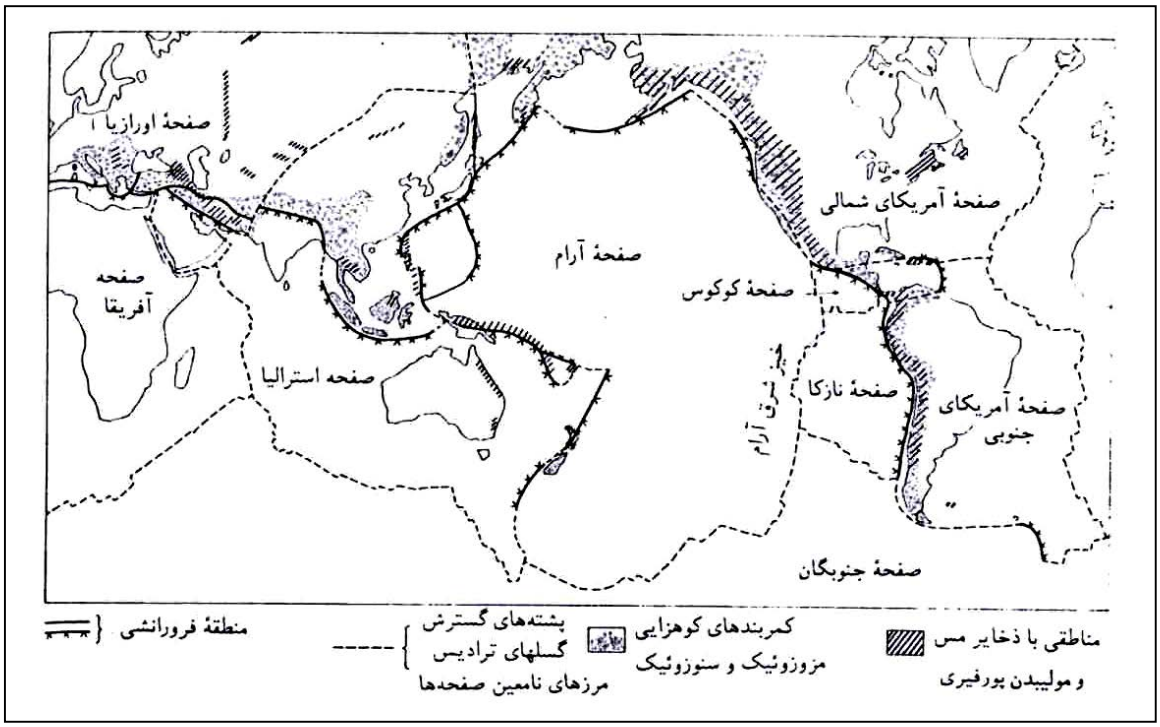
پس از تحقیقات کلاسیک لاول و گیلبرت مشخص شد که برخی از ذخایر مس پورفیری با توده های نفوذی دارای نسبت پایین عناصر قلیایی، همراه می باشند. نام های گوناگونی برای این دسته از ذخایر پیشنهاد شده است. یکی از این نام ها که پذیرشی عام یافته «مدل دیوریت» است؛ اگر چه پلوتون میزبان ممکن است یک سینیت، مونزونیت، دیوریت یا توده نفوذی قلیایی باشد. ذخایر مدل دیوریت نسبت به ذخایر مدل لاول ـ گیلبرت تفاوت هایی دارند؛ یکی از دلایل عمده این است که غلظت گوگرد در سیالات کانه زا نسبتاً پایین بوده است. به همین دلیل تمامی اکسیدهای آهن واقع در سنگ های میزبان به پیریت تبدیل نشده و مقدار زیادی از آهن در کلریت ها و بیوتیت ها باقی می ماند؛ در صورتی که آهن اضافی تمایل دارد به صورت مگنتیت(که ممکن است در تمامی مناطق دگر سانی وجود داشته باشد) درآید[۸].

(الف) منطقه بندی دگرسانی(Alteration zoning): مناطق دگرسانی فیلیک و آرژیلیک معمولاً وجود ندارد، از همین رو منطقه پتاسیک به وسیله منطقه پروپیلیتیک احاطه می شود. در منطقه پتاسیک، بیوتیت ممکن است برجسته ترین کانی پتاسیم دار باشد و اگر ارتوکلاز به خوبی تشکیل نشده باشد، پلاژیوکلاز ممکن است فلدسپار اصلی باشد.

(ب) کانه زایی: اختلاف اصلی مدل دیوریت با مدل لاول ـ گیلبرت این است که در این جا مقادیر قابل توجهی طلا وجود داشته و همچنین نسبت مولیبدن به مس معمولاً پایین است. شکستگی های حاوی کانی های سیلیکاتی باطله و سولفیدهای مس، ممکن است فاقد کوارتز باشد. از سوی دیگر کلریت، اپیدوت و آلبیت نسبتاً رایج است.

۲-۲-۶ توزیع ناحیه ای ذخایر پورفیری

شکل ۱-۶-۲-۲، توزیع ذخایر مس و مولیبدن پورفیری را نشان می دهد. از این نقشه می توان دریافت کرد که بیشتر ذخایر پورفیری با کمربندهای کوهزایی مزوزوییک و سنوزوییک همراه بوده و در دو خاستگاه اصلی (جزایر کمانی و حاشیه قاره ها) جای می گیرد. بیشتر ذخایر روسیه و قزاقستان و رخدادهای آپالاش ایالات متحده از استثناهای عمده هستند. این استثناها متعلق به پالئوزوییک بوده و فقط تعداد کمی از ذخایر پورفیری در پره کامبرین یافت شده است. این اصول از دیدگاه اکتشافی اهمیت زیادی دارد.



شکل۱- ۶-۲-۲ نواحی اصلی مس پورفیری و مولیبدن در جهان؛ علاوه بر این، مرز صفحات کنونی و کمربندهای کوهزایی مزوزوئیک ـ سنوزوئیک نیز نشان داده شده است[۸].

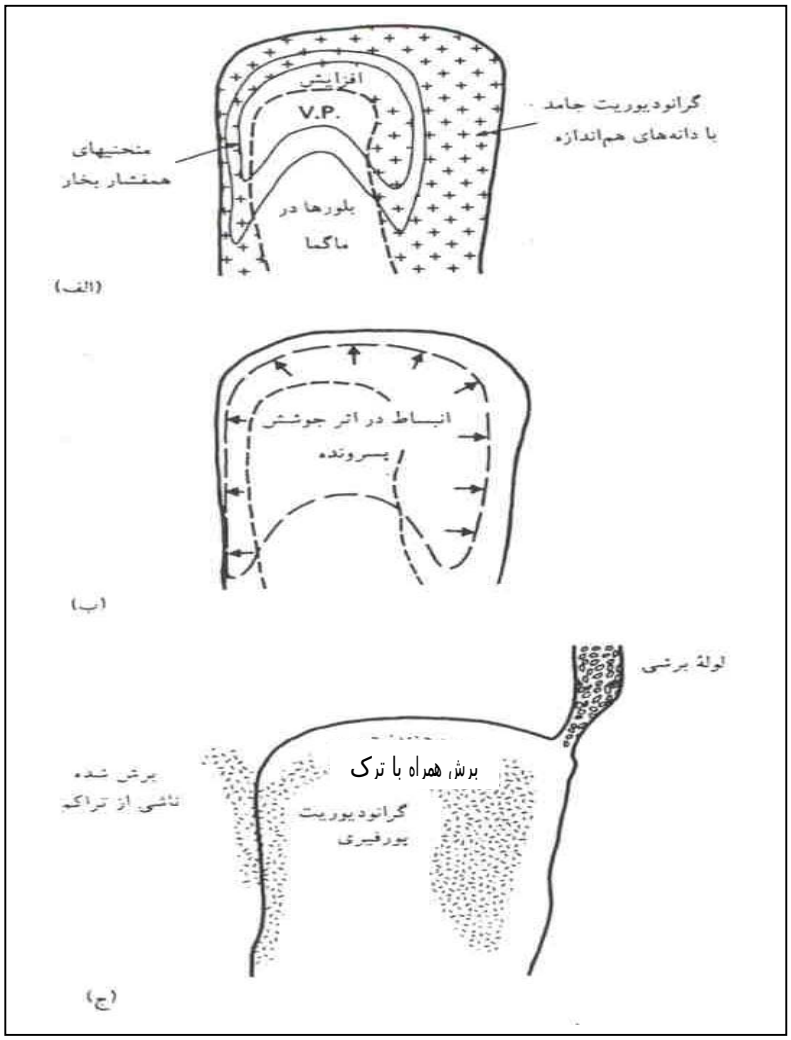
۷-۲-۲ ژنز ذخایر مس پورفیری

در سال های اخیر، مباحث اصلی، پیرامون ماگمایی یا جوی بودن سیالات کانه زا و منشا فلزات و گوگرد دور زده است. در ارتباط با تشکیل این ذخایر باید به یاد داشت که هنگام مقایسه آنها با دیگر کانسارهای گرمابی، مشخصه بارز ذخایر مس پورفیری ابعاد عظیم و شگفت آور آنهاست. اندازه و شکل این ذخایر ایجاب می کند که محلول های گرمابی، حجم بسیار بزرگی از سنگ اعم از سنگ های دیواره و پلوتون مادر را مورد هجوم قرار داده باشد. برشی شدن همرا با شکستگی(Carckle brecciation) نشان می دهد که دست کم مقداری از این محلول ها باید از پلوتون میزبان نشات گرفته باشند[۸].

(الف) برشی شدن ترکیدنی و منشا آن: برشی شدن ترکیدنی به شکستگی هایی گفته می شود که معمولاً در اثر پر شدن بارگچه ها، کانه زایی استوک وارک را به وجود می آورند. منطقه برشی شدن ترکیدنی معمولاً دایره ای شکل بوده و همیشه از کانسار(ore body) بزرگتر است و به سمت بیرون در منطقه پروپیلیتیک محو می شود. معمولاً در نزدیکی مرکز کانسار، به ویژه در صورت وجود دگرسانی پتاسیک، گسترش چندانی نمی یابد. باور بر این است که این برشی شدن ناشی از انبساط حاصل از آزاد شدن مواد فرار از ماگماست. به نظر می رسد که ماگماهای میزبان ذخایر مس پورفیری، پیش از آغاز تبلور همسان دانه در بخش های بیرونی، به ۰/۵ تا ۲ کیلومتری سطح زمین رسیده باشند. سپس توده های نفوذی متوقف شده و فشار همه جانبه (Confining pressure) نوسان نخواهد کرد. با توسعه پیوسته و یکنواخت تبلور، کانی های بدون آب تشکیل شده و ماگمای مایع، از مواد فرار غنی می شود که در نتیجه به افزایش فشار بخار می انجامد. در صورتی که

فشار بخار از فشار همه جانبه فراتر رود، پدیده ای به نام جوشش پسرونده(Retrograde boiling)، به وقوع پیوسته و مایعی که به سرعت در حال جوشش است، جدا می شود. اگر جوشش پسرونده در سنگی که مقدار زیادی منجمد شده است رخ دهد، فشار بخار علاوه بر فزونی یافتن بر فشار همه جانبه، بر مقاومت کششی این سنگ ها نیز غلبه می کند. این امر انبساط و برشی شدن گسترده و سریع را به دنبال خواهد داشت (شکل۱-۷-۲-۲). دلیل وقوع این پدیده آن است که آب آزاد شده در ژرفای حدود ۲ کیلومتری و دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد، دارای حجم مخصوص ۴ است و اگر ۱ درصد وزنی آن فازی مجزا بسازد، با افزایش حجمی در حدود ۱۰ درصد مواجه خواهیم بود.

در ژرفـای کمـتر، مـیزان ایـن افزایش از این هم بیشتر بوده و شدت شکستگی نیز بالاتر است. شاهد وقوع جوشـش پسرونده در ذخایر مس پورفیری، به صورت رخداد گسترده سیالات درگیر غنی از مایع و غنی از گاز در یک مقطع میکروسکوپی و در جوار یکدیگر دیده می شود.

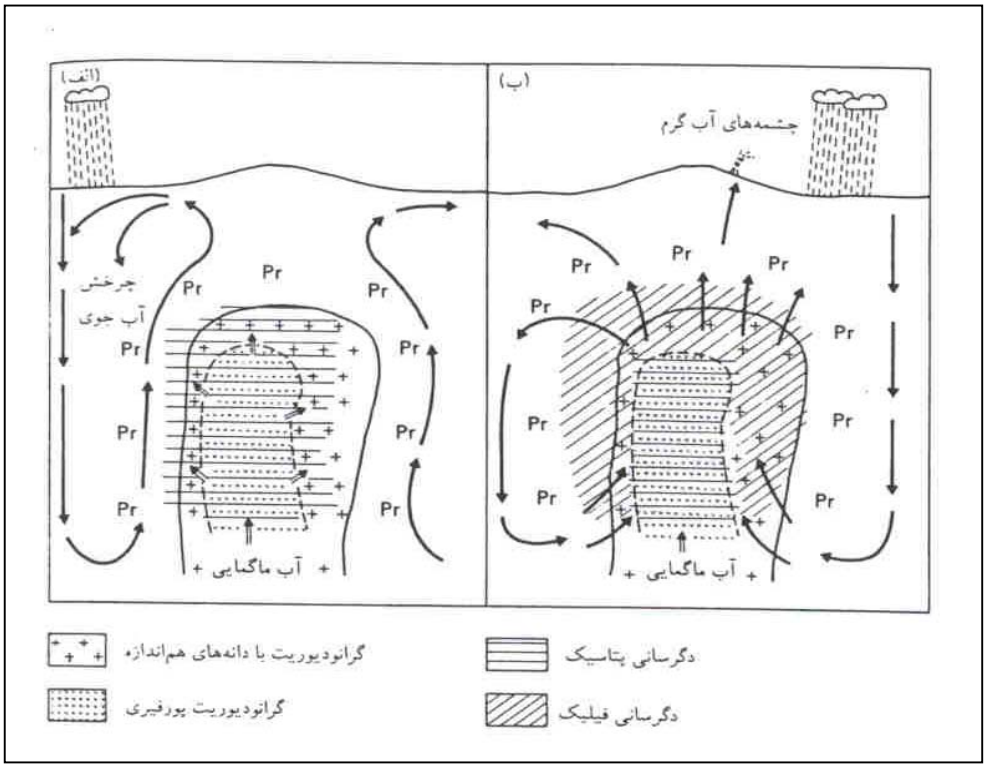


شـکل ۱-۷-۲-۲ سه مرحلهٔ تشکیل برش های همراه با ترک. الف) فشار بخار در بخش بالایی جزئی ماگمایی و اطراف آن افزایش می یابد، ب) جوشش پسرونده رخ داده و موجب انبساط می شود، ج) توزیع برش های حاصله[۸].

(ب) برخـی از فرایـندهای شـیمیایی تشـکیل ذخایـر مـس پورفیری: جوشش پسرونده، یک فاز آبگین (محلول گرمابـی) در یک سیستم پورفیری ایجاد می کند و یون کلرید به صورت یک یون بی سولفیدی به شدت در این فـاز شرکت می کند؛ البته مشروط بر این که شرایط برای پایداری فاز سولفیدی، مانند پیروتیت جمع شده باشد. یون بی سولفید نیز گوگرد مورد نیاز برای ته نشینی نهایی سولفید ها را فراهم می آورد.

(ج) شـواهد حاصـل از پژوهش های ایزوتوپی و ژئوشیمیایی: شواهد دیگری که حاکی از ماگمایی بودن دست کـم بخشـی از محلـول هـای گرمابـی اسـت، از بررسـی ایـزوتوپ هـای پایدار به دست می آید. آبهایی که با مجموعـه هـای دگرسـانی سـیلیکاتی پتاسیم دار در تعادل بوده و در دمای ۵۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد شکل گرفـته انـد، از نظـر ایزوتوپـی، از آبهـای ماگمایـی اولـیه قـابل تشخیص نیستند. از سوی دیگر آبهای همراه با سریسـیت هـای مـنطقه فیلیک دگرسانی، آبهای سازندی و جوی بوده اند. این نکته همراه با شواهد صحرایی و میکروسـکوپی نشـان مـی دهـد کـه دگرسـانی فیلـیک و آرژیلـیک دیرتر از دگرسانی های سیلیکات پتاسیم و پروپیلیتـیک بوده است. این دو مرحله دگرسانی در شکل۲-۷-۱-۲ نشان داده شده است. هنگام سرد شدن توده نفـوذی ممکن است این سیستم گرمابی جوی سازندی به سیستم ماگمایی رو به زوال نزدیک و مخلوط شده، و مـنجر بـه تشـکیل کانی های دما پایین تری مانند سریسیت، پیروفیلیت و کانی های رسی شود. این کانی ها، به ویـژه جانشـین فلدسـپار و بیوتیـت بخـش هـای بیرونی منطقه سیلیکات پتاسیم اولیه می شوند. احتمالاً وجود گرادیان های نسبتاً سریع pH ، دما ، شوری و غیره ، در سطح تماس میان این دو سیستم گرمابی، موجب تمرکز مس در اطراف منطقه مرزی میان مناطق سیلیکات پتاسیم و فیلیک می شود. با انجام این مرحله از دگر سانی که مرحله دوم است، یک کانسار مدل لاول و گیلبرت موجودیت می یابد.

(د) شـواهد سـیالات درگـیر: ملاحظه داده های میانبارهای سیال در مس های پورفیری بر یکنواختی قابل توجه سه ویژگی این ذخایر تاکید دارد: دماهای بیشینه (تا ۷۲۵ درجه سانتی گراد)، شوری بیشینه (تا ۶۰ درصد وزنی کلـریدهای قلیایـی) و شـواهد جوشـش در همـه کانسـارها. این داده ها از نظریه منشا ماگمایی سیالات کانه زا پـیروی می کند. میانبارهایی با بالاترین دما که سرشار از مس و فلزات دیگر هستند، شاخص بخش های مرکزی سیسـتم های پورفیری اند و الگوی پراکندگی آنها از الگوی دگرسانی _ کانه زایی منطقه ای پیروی می کند. دما و شـوری میانـبارهای سیال با گذشت زمان و همچنین با دور شدن از بخش مرکزی کاهش می یابد. تمامی این شواهد به خوبی با مفهوم بیان شده در شکل ۲-۷-۲-۲ سازگاری دارد.



شـکل ۲-۷-۲-۲ نـیمرخ هـای طرح گونه ای از یک ذخیرهٔ مس پورفیری که نشانگر دو مرحله تکوین سیالات گرمابی ایجاد کنندهٔ یک ذخیره براساس مدل لاول ـ گیلبرت است. ب) Pr ـ دگرسانی پروپیلیتیک[۸].

۸-۲-۲ مثالی از کانسارهای معروف مس پورفیری در جهان

معدن بینگهام:

- تاریخچه:

در دهۀ ۱۸۶۰ پی جویی ها منجر به کشف این معدن شد. در آنزمان برداشت از معدن به منظور استحصال سرب، نقره و طلا صورت می گرفت که بطور مستقیم ذوب می شد و نیازی به تهیۀ کنستانتره نداشته است.

در همان سال ها مهندس متالوژی دنیل جک لین (Daniel Jackling) به همراه مهندس معدن رابرت گمل (Robbert Gemmel) طرح فرآوری از معادن با عیار پایین را پی ریزی کردند، که منجر به راه اندازی روباز معدن شد.

یکی از دلیل های عمدۀ موفقیت معدن برنامۀ ۱/۵ میلیارد دلاری مجهز کردن معدن به تکنولوژی روز بوده است. معدنکاری با روند حفاری، انفجار و بارگیری انجام می شود که در روز ۲ تا ۴ انفجار صورت می پذیرد. کانسنگ کانه دار توسط بیل های مکانیکی ۵۳ تنی و تریلرهای ۲۱۸ تنی به کارخانۀ تغلیظ حمل می شود. مناطقی که حفاری می شوند، بدقت توسط GPS مشخص می شوند. در کارخانۀ تغلیظ ۴ خط وجود دارد و ۲۰٪ عملیات تغلیظ در کارخانۀ قدیمی صورت می گیرد. معدن احتمالا برای ۳۰ سال دیگر قادر به ادامۀ فعالیت خود می باشد[81]. برای جلوگیری از جاری شدن آبهای اسیدی به درون معدن، شرکت کنه کات یوتاکاپر، رشته ای از دیواره های آبند ناتراوا را تا عمق پی سنگ ایجاد کرده است تا جلوی حرکت آبهای زیرزمینی را

بگیرد. پشت این دیواره ها مخازنی برای انبار کردن باطله های حاصل از عملیات وجود دارد. آب این مخازن همراه با آبهای حاصل از تخلیهٔ باطله ها به کارخانه های فرآوری منحرف شده و از آن برای استفادهٔ دوباره در معدن و نیز بازیافت مس حل شده استفاده می شود.

(الف)

(ب) شکل۱-۱-۸-۲-۲ الف و ب ـ معدن روباز بینگهام؛ بزرگترین چالهٔ دست ساز بشر[46]

- معرفی:

معـدن بیـنگهام در کـوه های آکویر(Oquirrh) ۲۵ مایلی جنوب غربی سالت لیک سیتی(Salt Lake City) واقـع اسـت و یکـی از بزرگترین معادن روباز جهان است(شکل۱-۱-۸-۱-۲-الف و ب). مقدار برداشت سالیانه ایـن معـدن ۱۵ میلیون تن است. ابعاد کانسار ۲/۵× ۱ مایل و عمق آن ۰/۵ مایل می باشد و بزرگترین گودبرداری در سـطح زمیـن اسـت کـه توسط بشر انجام شده است. این معدن در ارتفاع زیادی واقع شده است. فاصلهٔ آن تا کارخانهٔ تغلیظ ۸ کیلومتر وتا کارخانهٔ ذوب ۲۰ کیلومتر است که با راه آهن به هم متصل شده است.

- زمین شناسی معدن:

کانـه زایی در ۴۰ میلیون سال پیش بر اثر محلولهای هیدروترمال یک تودهٔ نفوذی سرشار از مس، مولیبدن، طـلا و نقره و مقادیر کم پلاتین و پالادیوم صورت گرفته است. رخنمون توده توسط پوشش حاصل از هوازدگی مخفی شده است و کانسار غنی شده در سطح زمین مشاهده می شود.

- ذخیره، عیار و میزان تولید:

عـیار فلزات مختلف موجود در معدن در سال ۱۹۹۹ به قرار زیر است. مس ۰/۵۷٪ ، طلا ۰/۴۲ ppm، نقـره ۲/۷۷ ppm و مولیـبدن ۰/۰۴۲٪ اسـت. بیشـترین مقـدار برداشت از این معدن از سال۱۹۸۰ به بعد بود که روزانـه ۳۷۰۰۰۰ تـن کانسنگ و باطله برداشت می شود و سالانه ۳۰۰۰۰۰ تن مس خالص تولید می کند. مقدار کـل تولید کانه در سال ۱۹۹۹، ۵۸/۷ میلیون تن بوده که حاصل آن، ۱/۴ میلیون تن مس با عیار ۲۹/۹٪ و ۱۴۴۰۰ تـن کنسـتانتره مولیـبدن کـه ۱۰۱۰۰ تن مولیبدن خالص داشته است و در نهایت بعد از ذوب ۲۶۸۰۰۰ تن مس، ۴۱۳۰۰۰ 0z طلا و ۳/۲ moz نقره بدست آمده است.

۳-۲ کانسارهای مس با سنگ میزبان رسوبی

۱-۳-۲ مشخصات عمومی نهشته های سولفیدی چینه سان با گرایش رسوبی:

بیشتر این نهشته ها در محیط های دریایی یا دلتایی غیر آتشفشانی یافت می شوند. این نهشته ها از نظر زمانی و مکانی توزیع گسترده ای ، از پروتروزوییک تا ترشیاری دارند و ذخیره آنها می تواند از چند صد میلیون تن تا اندازه های نیمه اقتصادی متغیر باشد. به طور کلی از نظر شکل، عدسی مانند تا چینه سان بوده و طول آنها دست کم ده برابر پهناست. در بیشتر موارد بیش از یک لایه ماده معدنی وجود دارد. مناطق تغذیه کننده در زیر برخی از نهشته ها شناسایی شده و ممکن است در زیر بسیاری دیگر نیز وجود داشته باشند، اما از آن جا که عملیات معدنکاری به ندرت در مقیاسی وسیع به داخل کمر پایین نفوذ می کند، احتمالاً هرگز دیده نخواهند شد. تفاوت میزان دگر شکلی و دگرگونی این نهشته ها با سنگ های میزبان، حاکی از تشکیل آنها پیش از عملکرد فرایند دگرگونی است. این نهشته ها بخصوص آنهایی که در شیل ها قرار دارند، معمولاً سرشار از مواد آلی بوده و اغلب مجموعه کانی ها و فلزات قابل بازیافت آنها نسبت به نهشته های سولفید توده ای همراه با آتشفشانی، از پیچیدگی و تنوع کمتری برخوردار است. اندازه دانه های سولفید کوچک بوده و اغلب برای جدا کردن آنها از باطله، باید به روش های خردایش پر خرج متوسل شده و سنگ را بیش از حد معمول خرد

کرد. این نهشته ها ممکن است از ساحل به سمت حوضه رسوبی، دارای منطقه‌بندی Cu + Ag→ Pb→ Zn باشد. نهشته های مس و سرب ـ روی تمایل به جدا شدن از یکدیگر داشته و نسبت های شاخص فلزی متفاوتی دارند. خاستگاه های زمین شناسی این نهشته ها عمدتاً درون کراتونی(Intracratonic) است و به نظر نمی رسد بیشتر آنها به طور مستقیم با وقایع کوهزایی یا فعالیت حاشیه صفحه ها در ارتباط باشد. خاستگاه های ناحیه ای عبارتند از (۱) اولین پیشروی دریا بر روی رسوبات قاره ای (کوپفرشیفر، زامبیا، وایت پاین ایالات متحده آمریکا)، (۲) توالی های کربناتی قاره ای (ایرلند)، (۳) حوضه های رسوبی کنترل شده به وسیله گسل (حوضه سلوین(Selwyn)، یوکون(Yukon)، حوضه بلت ـ پرسل(Belt Purcell)، بریتیش کلمبیا). به نظر می رسد برخی از این محیط ها اولاکوژن(Aulacogen) باشند. از نظر اقتصادی هم ذخایر مس و هم ذخایر سرب و روی در مقیاس جهانی از اهمیت بالایی برخوردارند. در واقع ذخایر مس چینه سان دارای سنگ میزبان رسوبی، پس از مس های پورفیری، تولید کننده دوم این فلز به شمار می آیند.

۲-۳-۲ ذخایر مس در سنگ میزبان رسوبی:

مهمترین منبع کبالت دنیا (از کمربند آفریقای مرکزی) بوده و تولید کننده مهم محصول جنبی نقره (لهستان و ایـالات متحده) به شمار می آید. عیار بیشتر کانسارهای بهره برداری شده یا در دست بهره برداری، از ۱/۱۸ تا ۵ درصـد مـس تغییـر می کند، اما کانسارهایی با عیار کمتر، پشتوانه‌ای معتبر هستند. ذخیره می تواند بسیار زیاد باشـد، بـرای مـثال لوبین (Lubin)در لهستان، ۲۶۰۰ میلیون تن کانسنگ با عیار ۲ درصد مس، ۳۰ تا ۸۰ گرم در تن نقره، و ۰/۱ گرم در تن طلا دارد.

بیشـتر کانسـارهای اصـلی در شـیل هـای آهکی احیا شده پیریتی غنی از مواد آلی، یا هم ارز دگرگونی آنها یافت می شوند، اما تقریباً ۱/۳ باقیمانده آنها در ماسه سنگ هاست. این سنگهای میزبان، در رسوبات بی اکسیژن (Anoxic) پارالـیک(Paralic) دریایی (یا رسوبات دریاچه ای شور بزرگ مقیاس) که بلافاصله بر روی رسوبات تخریبـی قاره ای قرمز و اکسید شده واقع است یافت می شود و این نوع نهشته ها در توالی های سنگی پس از نخسـتین ظهـور لایـه های قرمز (۲۴۰۰ میلیون سال) قرار دارند و سن آنها تا عصر حاضر می رسد. مهمترین و فراوانتریـن نهشـته هـا در سنگ های پروتروزوییک بالا و پالئوزوییک بالا قرار دارد که در نواحی خشک و نیمه خشـک محـیط هـای کافتی قاره ای، حداکثر تا عرض ۲۰ـ۳۰ از دیرینه استوا(paleoequator) تشکیل شده اند. بسـیاری مـناطق ایـن سنگ ها دارای میان لایه هایی از سنگ های تبخیری است. در مرز اکسایش، کاهش توالی بـالا رونـده کانـی هـا در مـنطقه مینرالـیزه، شامل تمامی کانی های زیر یا برخی از آنهاست: هماتیت، مس آزاد، کلکوسـیت، برنیـت، کلکوپیریـت، گالـن، اسفالریت و پیریت. این کانی ها در مناطق کانیایی که به سمت بالا و بیرون با یکدیگر همپوشی دارند، یافت می‌شوند.

این نوع کانسارها را تیپ کوپفرشیفر(Kupferschiefer) نیز نامگذاری کرده اند. مناسب ترین نام که تا حال بـرای آنهـا بـیان شـده اسـت، کانسـار مـس اسـتراتیفرم بـا سـنگ مـیزبان رسـوبی است که به اختصارSCD یا Sediment-Hosted Stratiform Copper Deposits مـی نامند. برخلاف تعداد کم، SCD ها یکی از مهمترین

منابع مس جهان محسوب می شوند. عیار ثابت و تداوم افقی این کانسارها، آنها را یکی از اساسی ترین منابع برای اکتشاف مس و سایر عناصر همراه نموده است. این کانسارها می توانند دارای عیار بالای کبالت، روی و نقره باشند و همچنین می توان منابع عظیم طلا و اورانیوم، عناصر گروه پلاتین(PGE) و عناصر خاکی کمیاب (REE) را بعنوان محصول فرعی در آنها یافت. کانسارهای مس رسوبی ۲۵٪ تا ۳۰٪ مس مورد نیاز جهان را تامین می کنند که بیشترین حجم آن نیز از محدودهٔ کمربند مس آفریقا بدست می آید. ذخایر این کانسارها از کمتر از ۱ میلیون تن تا ۱۰۰۰ میلیون تن متغیر است[۲۲]

۲-۳-۳ ویژگیهای مهم SCD :

۱- حضور منطقهٔ مس دار مهم، سرب و روی بطور استثنایی و همچنین سایر فلزات مانند نقره و کبالت می توانند اهمیت اقتصادی مهمی داشته باشند.
۲- وجود آنها در سنگ های رسوبی بدون نیاز به فعالیت اساسی آذرین و دگرگونی.
۳- شکل تقریبا هم شیب و چینه سان پهنهٔ مس دار.
۴- امتداد جانبی کانه زایی در لایه بندی.
۵- وفور سولفیدهای فلزی پراکنده در سنگ میزبان.
۶- توزیع منطقه ای فلزات و کانه ها.
۷- رسوبات میزبان که با عوامل احیاء کننده و سولفیدهای فراوان بطور Syndiagenetic جهت ورود مس آماده شده اند.
۸- وجود ضخامتی مناسب از رسوبات تخریبی درشت دانه، نفوذ پذیر و قرمز رنگ در زیر منطقهٔ مس دار.
۹- وجود یک واحد رسوبی مربوط به محیط های گرم و خشک(مانند واحدهای تبخیری و قرمزرنگ).
۱۰- زمان سنجی مس، زمان پس از رسوبگذاری و دیاژنز را نشان می دهد.
۱۱- رسوبگذاری مس از محلول های غنی از کلرید در افق تقاطع بین رسوبات قرمز زیرین و لایه های خاکستری سولفید دار.
۱۲- ارتباط مکانی با حوضه های ریفتی پرشده با رسوبات قرمز قاره ای.

آخرین ویژگی در سال های اخیر بیشتر مورد ارزیابی قرار گرفته است و هنوز به اطلاعات اساسی نیاز دارد. از وابستگی فضایی این کانسارها با ریفت های قاره ای و نیز جانشینی مس در رسوبات پرکنندهٔ ریفت می توان پیشنهاد داد که مکانیزم های تشکیل ذخیره می تواند اساسا با توسعه و تکامل طبیعی حوضه مرتبط باشد[۲۲].

۲-۳-۴ خاستگاه:

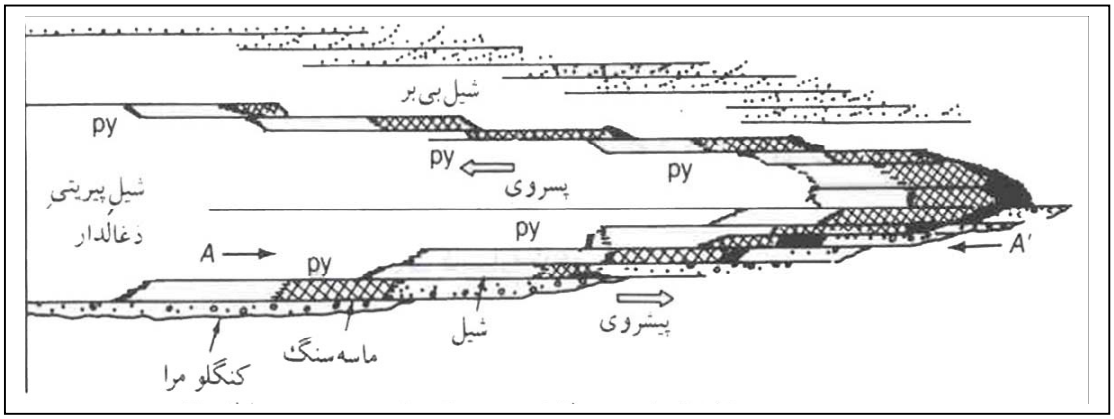
تحقیق های انجام شده در مورد ذخایری از این نوع در سراسر جهان، باعث شد اغلب پژوهشگران به این نتیجه برسند که مس و فلزات همراه آن پس از رسوبگذاری و بعد از این که تمرکز بسیار آغازین همزمان با دیاژنز(Syndiagenetic) سولفات ها و سولفیدها تشکیل شد، به سنگ میزبان افزوده می شود. برخی از سولفات ها و سولفیدها به ویژه پیریت به وسیله کانی های بعدی مس و کبالت جانشین شده است. امروزه سیماهایی از این قبیل و ماهیت پیشرونده کانه زایی در بسیاری از کانسارها گزارش شده است. ارتباط آشکار مکانی میان کانه زایی سولفید و هماتیت در کوپفرشیفر نشان می دهد که ژنز کانسنگ در ارتباط نزدیک با فرایندهای به وجود آورنده رخساره روته فاول است. منطقه بندی فلزی پیشرونده در لایه ها، تمرکز نهشته های مس در اطراف رخساره روته فاول و همزیستی دانه های هماتیت، شکل های کاذب هماتیت به جای پیریت، جانشینی سولفیدهای فلزی و سولفید مس به جای پیریت های پیشین موجود در بخش بیرونی رخساره روته فاول یک منشا پس رسوبگذاری برای سیستم کانسنگی روته فاول نشان می دهد. تصور می شود که محلول های کانه ای، آبهای سازندی فلزداری بوده اند که پس از آبشویی بیشتر محتوای مس روتلی جندز، از آن جدا شده اند. بیشتر شواهد نشان می دهد که رسوبگذاری و کانه زایی کمربند مس آفریقای مرکزی در یک منطقه کافتی به وقوع پیوسته است و کانه زایی ناشی از نشت گرمابی (Hydrothermal Leakage) از شکستگی های محصور کننده آبهای شور سازندی است که Cu , Co , Fe را افزون بر دسته وسیعی از عناصر فرعی، از پی سنگ و بویژه از بازالت ها شسته است. پژوهش های ایزوتوپی نشان می دهد که گوگرد سولفید ها سولفات آب دریا بوده است که از پیش در آرنیت ها به شکل انیدریت موجود بوده و از راه احیای معدنی دما بالا، از آن آزاد شده است. فلزات در شیل ها، احتمالاً تحت تاثیر گوگرد احیا شده باکتریایی در دمای ۱۴۰ تا ۲۱۵ درجه سانتی گراد ته نشین شده اند.

۲-۳-۵ مثال هایی از کانسارهای مس با سنگ میزبان رسوبی در دنیا:

- کمربند مس آفریقا:

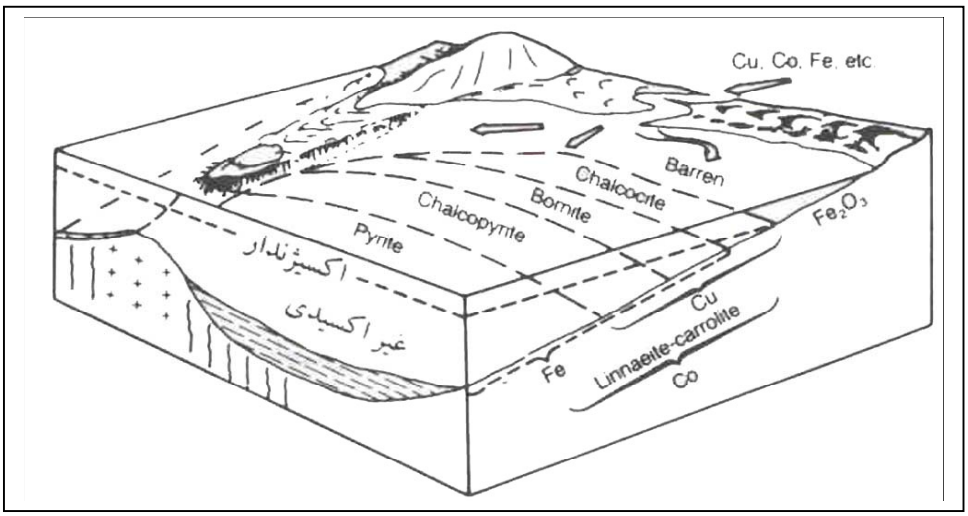
این محدوده بزرگترین کانسار مس با سنگ میزبان رسوبی است که در کشورهای زامبیا، کنگو و زئیر توسعه دارد. ذخیرهٔ این کانسار در کنگو به بیش از ۱۰۰ میلیون تن و در زامبیا به حدود ۹۰ میلیون تن می رسد. این کانسار در طبقات پروتروزوئیک قرار داشته و علاوه بر مس دارای مقدار فراوان کبالت است. سن آن به ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ میلیون سال می رسد.

توده های معدنی اصلی در رسوبات سوپر گروه کاتانگا (Katanga) قرار دارد که در حوضهٔ کراتنی و با امتداد شمال غربی رسوب کرده است. کنگلومراها، آرنایت ها و آرنایت های فلدسپاتی رخساره های قاره ای به سمت بالا به رسوبات متنوع تری تبدیل می شوند که این امر نشانگر شرایط متلاطم دریایی است که به سمت شرق پیشروی کرده است(شکل ۱-۵-۳-۲ و ۲-۵-۳-۲).



شکل ۱-۵-۳-۲ ساخت منطقه ای و رخساره های رسوبی در مناطقی از کمربند مس زامبیا، با پیشروی دریا بسمت خشکی(سمت راست)، پیریت(Py) و رخساره مس دار(سیاه) بطرف سمت راست پیشروی می نماید. با پسروی دریا، این مجموعه(بجز کنگلومرا) بطرف سمت چپ پسروی می نماید[۲۴].

کانـه زایـی کبالـت در این کانسار، بخوبی مس می باشد. نسبت کبالت به مس به سمت بیرون توده های معدنی زئـیر افـزایش مـی یـابد کـه شـبیه منطقه بندی کانه های مس از کالکوزیت به بورنیت و کالکوپیریت می باشد (شکل ۲-۵-۳-۲)[۲۲].



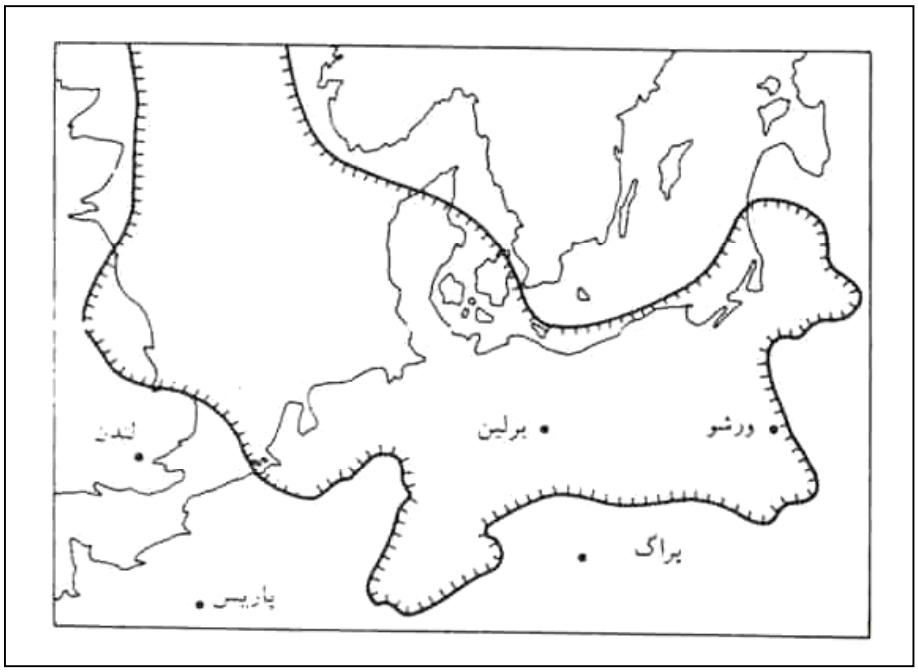
شکل ۲-۵-۳-۲ تصویری نمادین از ساخت منطقه ای در کمربند مس زامبیا[۲۴].

آنـل و سـیموند (Annels & Simmonds) در سـال ۱۹۸۴ بدلیل وجود کبالت به مقدار فراوان، نتیجه گرفتند که فلزات از هوازدگی زمین های اطراف ساحل مشتق نشده است. بنابراین آنها یک منشاء آتشفشانی مافیک وابسته با ریفت را برای این فلزات پیشنهاد کردند[۲۲].

- کوپفرشیفر اروپا:

این نهشته احتمالاً شناخته شده ترین شیل غنی از مس دنیاست. سن آن پرمین پسین بوده و در ناحیه مانسفلد آلمان تقریباً ۱۰۰۰ سال مورد بهره برداری قرار گرفته است. کوپفرشیفر در کشورهای آلمان، لهستان،

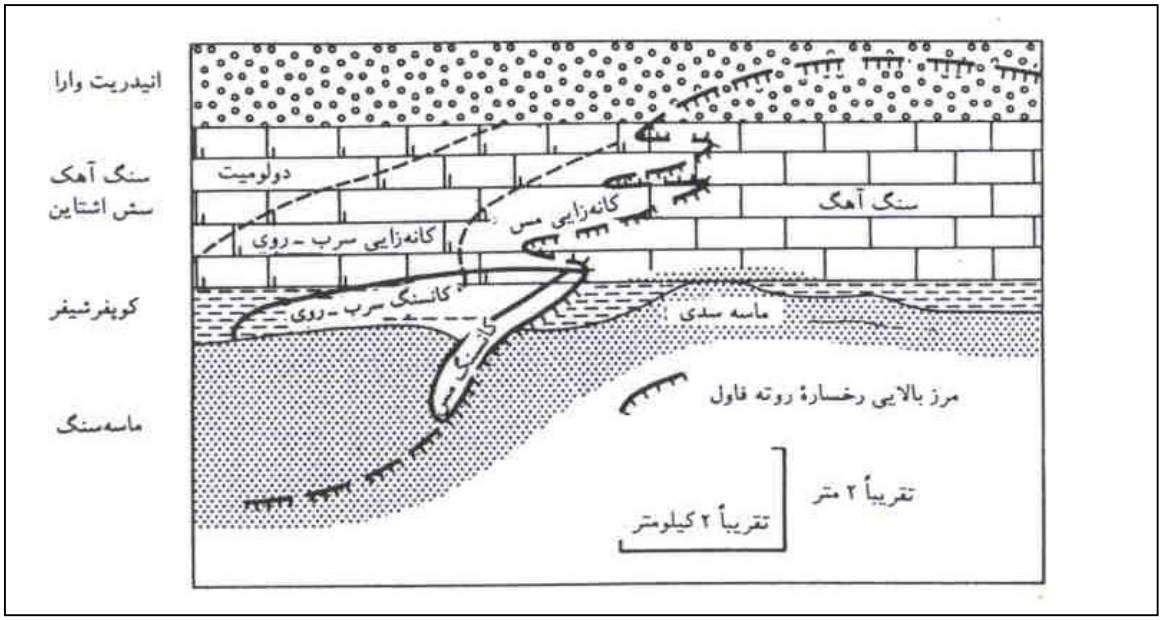
هلند و انگلستان در حدود ۶۰۰ هزار کیلومتر مربع وسعت دارد(شکل۳-۵-۳-۲). غلظت های بالاتر از ۰/۳ درصد مس، تقریباً در ۱ درصد این ناحیه و غلظت های بالاتر از ۰/۳ درصد روی تقریبا در ۵ درصد این نواحی یافت می شود. بنابراین اگر چه در تمام کوپفرشیفر مقدار فلزات پایه به نحو نابهنجاری بالاست اما فقط در نواحی محدودی عیارهایی در حد یک کانسنگ وجود دارد. برجسته ترین اکتشاف های اخیر مربوط به جنوب لهستان است که دو دهه گذشته نهشته هایی در ژرفای ۶۰۰ تا ۱۵۰۰ متر در آن پیدا شده است. ضخامت کوپفرشیفر در این ناحیه بین ۰/۴ تا ۵/۵ متر متغیر است. میانگین مس حدود ۱/۵ درصد است و وجود ذخیره ۳۰۰۰ میلیون تنی با ۱ درصد مس لهستان را به اولین تولید کننده مس در اروپا مبدل کرده است. منطقه پوشیده شده به وسیله این نهشته ها، ابعادی در حدود۶۰×۳۰ کیلومتر دارد. کوپفرشیفر از لایه های متناوب نازک کربناتی، رس و مواد آلی همراه با بقایای ماهی تشکیل شده است که موجب رنگ خاکستری تیره یا سیاه شاخص آن می شود. کوپفرشیفر نخستین واحد پیشروی دریایی بر روی واحد غیر دریایی روتلی جندز (Rotliegendes) پرمین زیرین است. روتنلی جندز توالی ماسه قرمزی است که در زیر سنگ آهک زخ اشتاین (Zechstein) که به وسیله یک توالی ضخیم تبخیری پوشیده می شود، قرار می گیرد[۸].



شکل ۳-۵-۳-۲ حدود دریای زخ اشتاین در اروپای مرکزی. کوپفرشیفر در قاعدهٔ پرمین بالایی(زخ اشتاین) قرار دارد [۸].

کوپفرشیفر و تبخیری های زخ اشتاین ممکن است نشان دهندهٔ وجود یک محیط باتلاق کشندی (Tidal Mars) (سبخایی) باشد که هنگام پیشروی دریا بر روی ماسه های بیابانی تشکیل شده است. کانه زایی سولفید در سطح تماس میان توالی دریایی پرمین بالایی زخ اشتاین و لایه قرمز پرمین پایینی روتلی جندز قرار دارد. کانسنگ در کوپفرشیفر، سنگ آهک بالایی و ماسه سنگ زیرین قرار دارد. مس و دیگر فلزات در سراسر زمینه سنگ به صورت سولفیدهایی ریز دانه(عمدتاً برنیت، کلکوسیت، کلکوپیریت، گالن، اسفالریت) پراکنده اند

و معمولاً جانشین سیمان کلسیتی قدیمی تر، قطعات سنگی و دانه های کوارتز و همچنین سولفیدهای دیگر می شود. شکل۴-۵-۳-۲ سیماهای شاخص کانی زایی را نشان می دهد. رگچه های افقی و قائم ژیپس، کلسیت و سولفیدهای فلزات پایه در منطقه لوبین رایج بوده و عیار کانسنگ را به طور قابل توجهی بالا می برد. این رگچه ها را ناشی از شکسته شدگی هیدرولیکی می دانند. یک منطقه قرمز شدگی دیاژنزی که به عنوان رخساره روته فاول(Rote Faul Facies) شناخته شده است، بر روی افق های چینه شناختی پیشروی می کند. کانه زایی مس مستقیماً روی روته فاول قرار می گیرد و منطقه مس دار نیز خود به وسیله کانه زایی سرب و روی پوشیده می‌شود. وجود چنین رابطه هایی بین کانه زایی و روته فاول بدین معنی است که مشخص و محدود کردن این رخساره مهمترین سیمای جستجو برای کانسار های جدید است. مناطق مس دار روته فاول با بلندی های زیرین در پی سنگ مدفون منطبق بوده و شیب منطقه بندی فلزی از این بلندی ها به سمت مراکز حوضه است. یکی از جنبه های کشف شده جدید کوپفرشیفر لهستان که هنوز مورد بهره برداری قرار نگرفته، رخداد شیل های غنی از پلاتین(10 ppm<) در امتداد لایه ها، در طولی بیش از ۱/۵ کیلومتر است. مقادیری بیش از ۲۰۰ قسمت در میلیون پلاتین نیز در طولی بیش از ۵۰ متر در این راستا یافت شده است. شیل های غنی از فلزات گروه پلاتین (PGM)، در کانادا، چین، اروپای مرکزی و ایالات متحده کشف شده و می تواند یک منبع احتمالی برای این فلزات باشد.



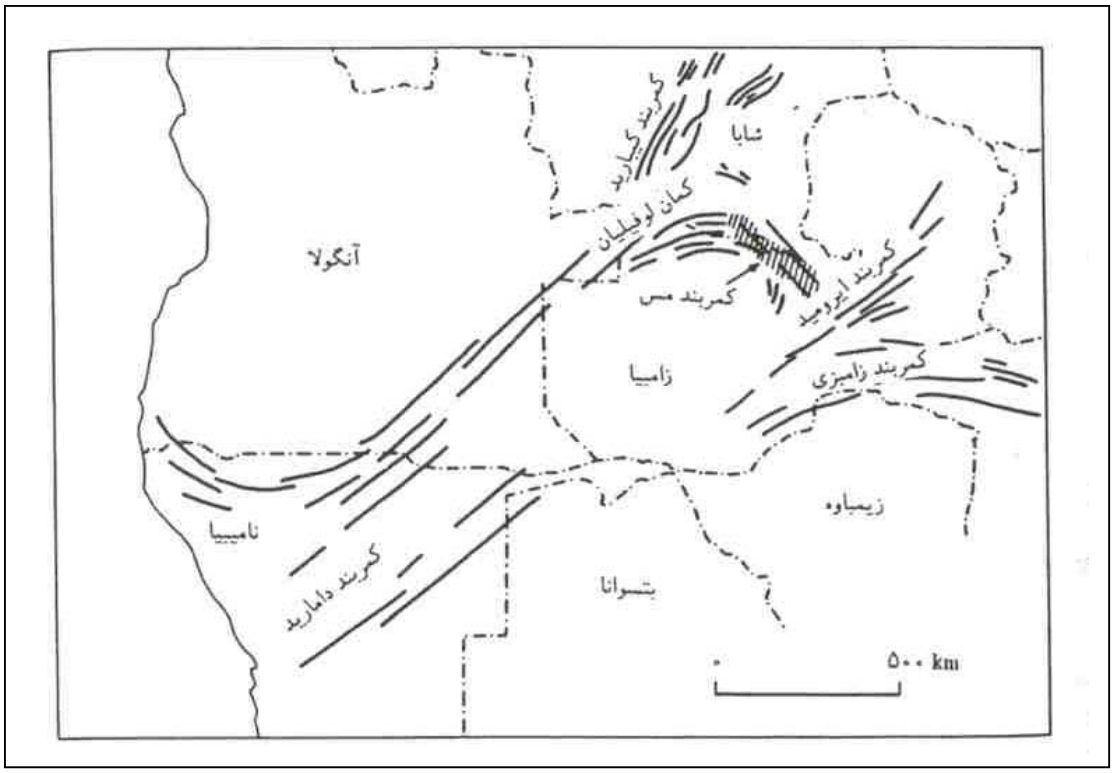
شکل ۴-۵-۳-۲ نیمرخی طرح گونه از کانسار در زخ اشتاین، قاعده ای با دگرسانی رخساره های روته فاول که با شیب ملایم بر روی لایه بندی بالای منطقهٔ سدهای ماسه ای حاصل از فرسایش و انتقال اجزای روتلی جندز پیشروی می کند. کانه زایی سولفیدی و سرب و روی دورتر از آن قرار دارند[۸].

- کمربند مس زامبیا:

این کانسارها که بخشی از کمربند بزرگ مس آفریقای مرکزی واقع در زامبیا و شابا(shaba)(زئیر) است، در حدود ۱۷ درصد مس جهان غرب را در دهه ۱۹۸۰ تولید کرده است. زامبیا درسال ۱۹۸۴، ۵۳۱۰۰۰ تن مس تولید کرد و عیار کانسنگ آسیایی در معادن اصلی از ۱/۴۹ تا ۲/۸۱ درصد متغیر است؛ افزون بر این از بعضی

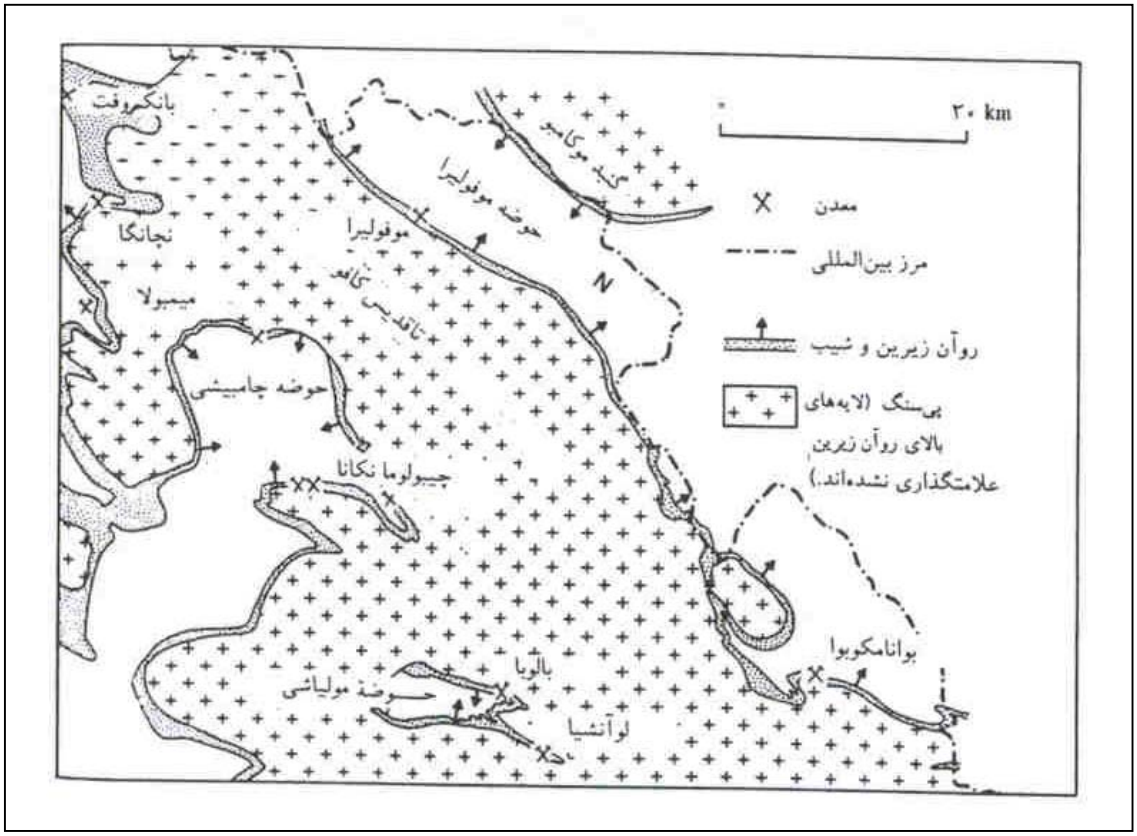
معادن، مقادیر قابل توجهی کبالت به عنوان محصولی جنبی به دست آمده است. در زامبیا صنعت به سرعت رو به اضمحلال است. واقعیت تلخ، قدیمی بودن معادن این کشور است و علاوه بر آن عیار کانسنگ ها، سیری نزولی داشته و هنوز به طور متوسط ۱۰ سال فعالیت در پیش رو دارد و کشور به آسانی نمی تواند سرمایه گذاری لازم برای افزایش کارایی و سودآوری آنها را انجام دهد. شابا در سال ۱۹۸۴ تقریباً ۵۰۰۰۰۰ تن مس از کانسنگ هایی با میانگین تقریبی ۴ درصد Cu+Co تولید کرده است؛ اما در این جا نیز صنعت رو به اضمحلال بوده و تولید پایین است[۸].

تقریباً تمام مس استخراج شده در سال ۱۹۸۴، از افق های محصور در رسوبات پروتروزوییک کاتانگایی در لوفیلیان آرک(Lufilian Arc) به دست آمده است (شکل۵-۵-۳-۲).



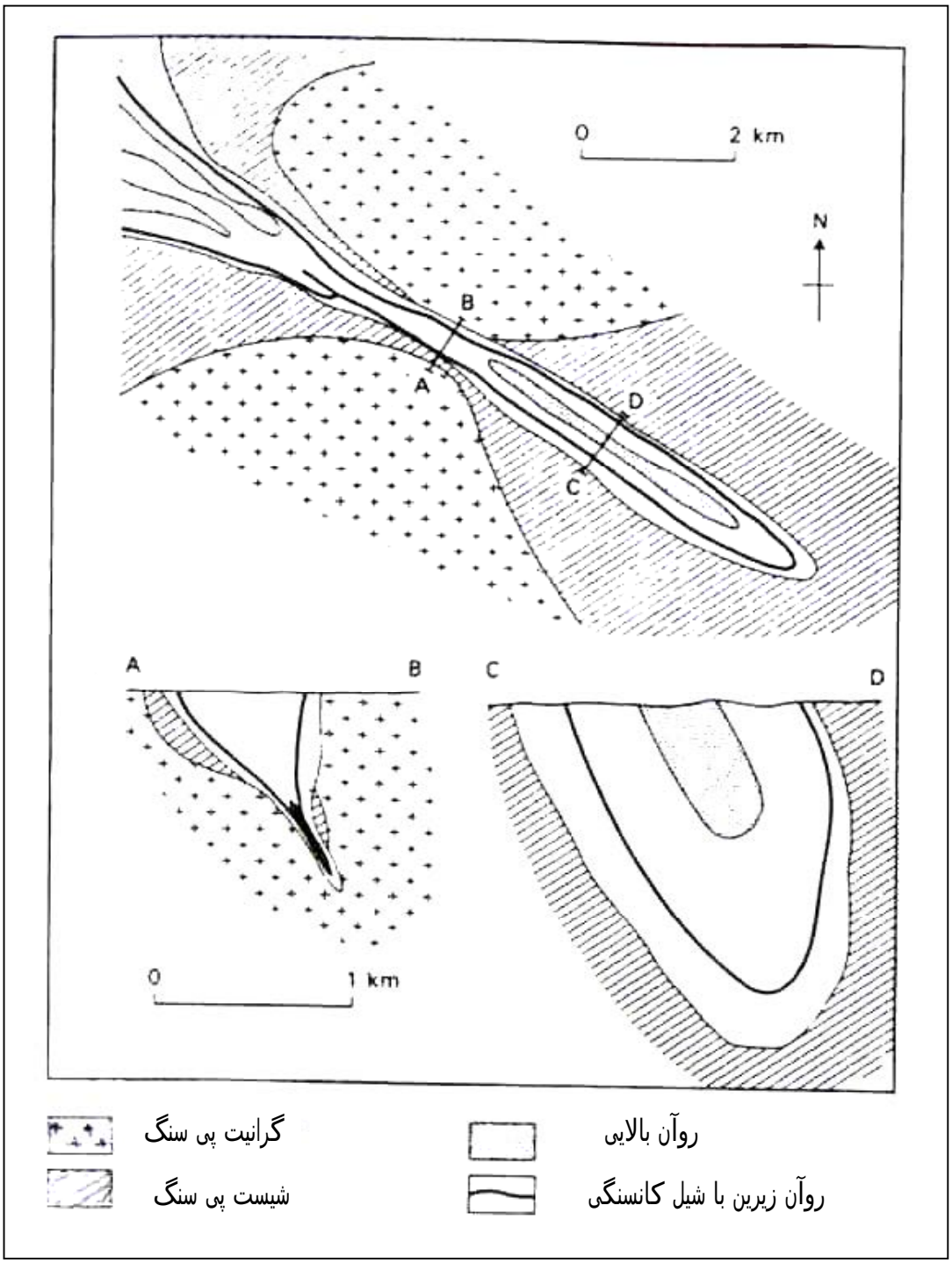
شکل ۵-۵-۳-۲ موقعیت مکانی کمربند مس نسبت به روندهای زمینساختی آفریقای مرکزی [۸].

کاتانگا به طور دگر شیب روی یک پی سنگ گرانیت ـ شیست ـ کوارتزیت قرار می گیرد و پایین ترین بخش رسوبات کاتانگا، دره های سرزمین پیش از کاتانگا را پر می کند. در زامبیا و شابای جنوب شرقی بیشتر کانه زایی در سازند اور(Ore Formation) که چند متر بالاتر از سطح پر شدگی توپوگرافی پیش از کاتانگاست، قرار دارد. شیل یا شیل دولومیتی سنگ میزبان حدود۶۰ درصد از منطقه مینرالیزه را تشکیل می دهد و کانسارهای شیلی یک گروه خطی به سمت جنوب غرب تاقدیس کافو(Kafue) می سازند(شکل۶-۵-۳-۲).



شکل ۶-۵-۳-۲ نقشهٔ موقعیت مکانی کمربند مس زامبیا که زمین شناسی ناحیه ای منطقه را نشان می دهد[۸].

کانسنگ هایی با سنگ میزبان آرکوز ـ آرنیت بیشتر در شمال شرق تاقدیس قرار دارند از جمله موفولیرا (Mufulira). توالی کمر پایین متشکل از کوارتزیت، ماسه سنگ های فلدسپاتی و کنگلومراهایی با هر دو منشاآبی و بادی است. سازنداور، معمولاً با ضخامت ۱۵تا ۲۰ متر ، به وسیله مجموعه های متناوبی از آرنیت و آرژیلیت پوشیده می شود که با سنگ های زیرین گروه روان زیرین را می سازند(Lower Roan Group) تمام سنگ ها و کانی های مس واقع در آنها دگرگونی رخساره شیست سبز درجه پایین تا بالا را متحمل شده و بسیاری از به اصطلاح شیل ها، بیوتیت شیست هستند. این سنگ ها در برخی نقاط به شدت چین خورده اند(شکل۷-۵-۳-۲). مس همراه با مقدار ناچیزی آهن و کبالت، بیشتر در بخش های زیرین سازند اور به صورت کانی های افشان بورنیت، کلکوپیریت، و کلکوسیت یافت می شود. در برخی نقاط کانه زایی در لایه‌های بالایی نیز سرایت می کند. حد بالایی و زیرین کانه زایی معمولاً مشخص و ناگهانی است.



شکل ۷-۵-۳-۲ نقشهٔ ساده و نیمرخ های نهشتهٔ لوآنشیا، زامبیا[۸].

۲-۴ کانسارهای مس ماگماتیکی

ایـن کانسـارها در نتـیجهٔ تجمـع قطرکهایـی از مایعات سولفیدی ـ اکسیدی درون ماگمای سیلیکاتی و در بخـش پاییـن آن و یـا به صورت تزریقی و بدور از اطاقک ماگمایی حاصل می شوند، که مهمترین عامل تجمع این فلزات، نیروی ثقل است[61].

این کانسارها دارای انواع مختلفی است. انواع مس دار آن شامل

۱- پیکریت های حاوی سولفیدNi-Cu مانند کانسارهای موجود در پشنگا.

۲- کانسارهای Cu-Ni وابسته به کافت های حاشیهٔ قاره و افیولیت ها که مثال آن معدن تامپسون است.

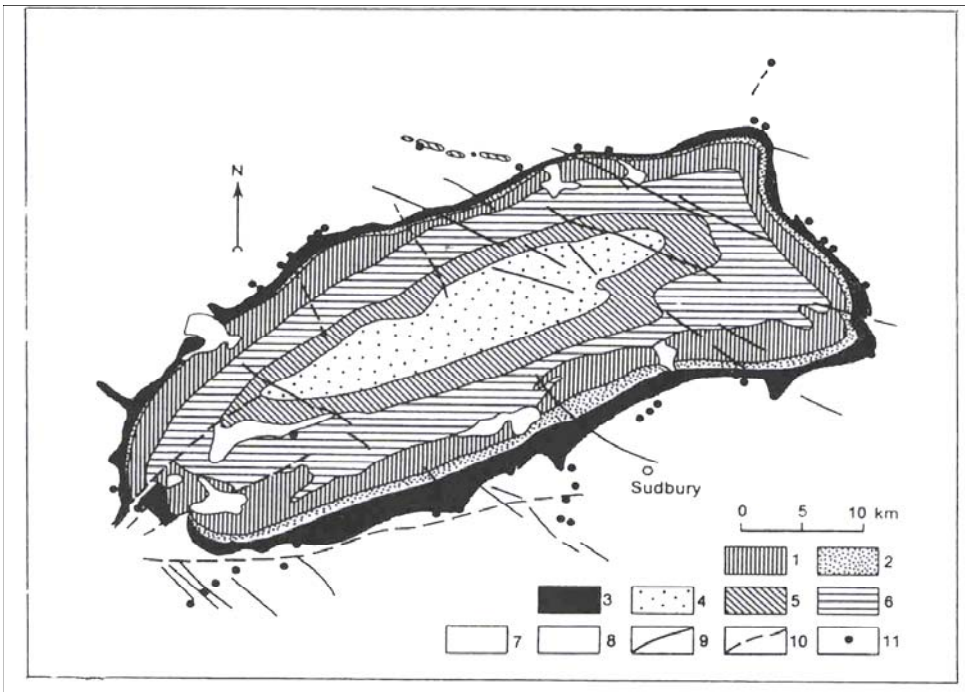
۳- نوع Ni-Cu در ارتباط با بازالت های سیلانی است مانند کانسار نورسیک.

۴- کانسارهای لایه لایه ای سولفیدی مانند سدبوری کانادا که دارای اهمیت هستند[۲۴].

۲-۴-۱ مثالی از کانسارهای مس ماگماتیکی

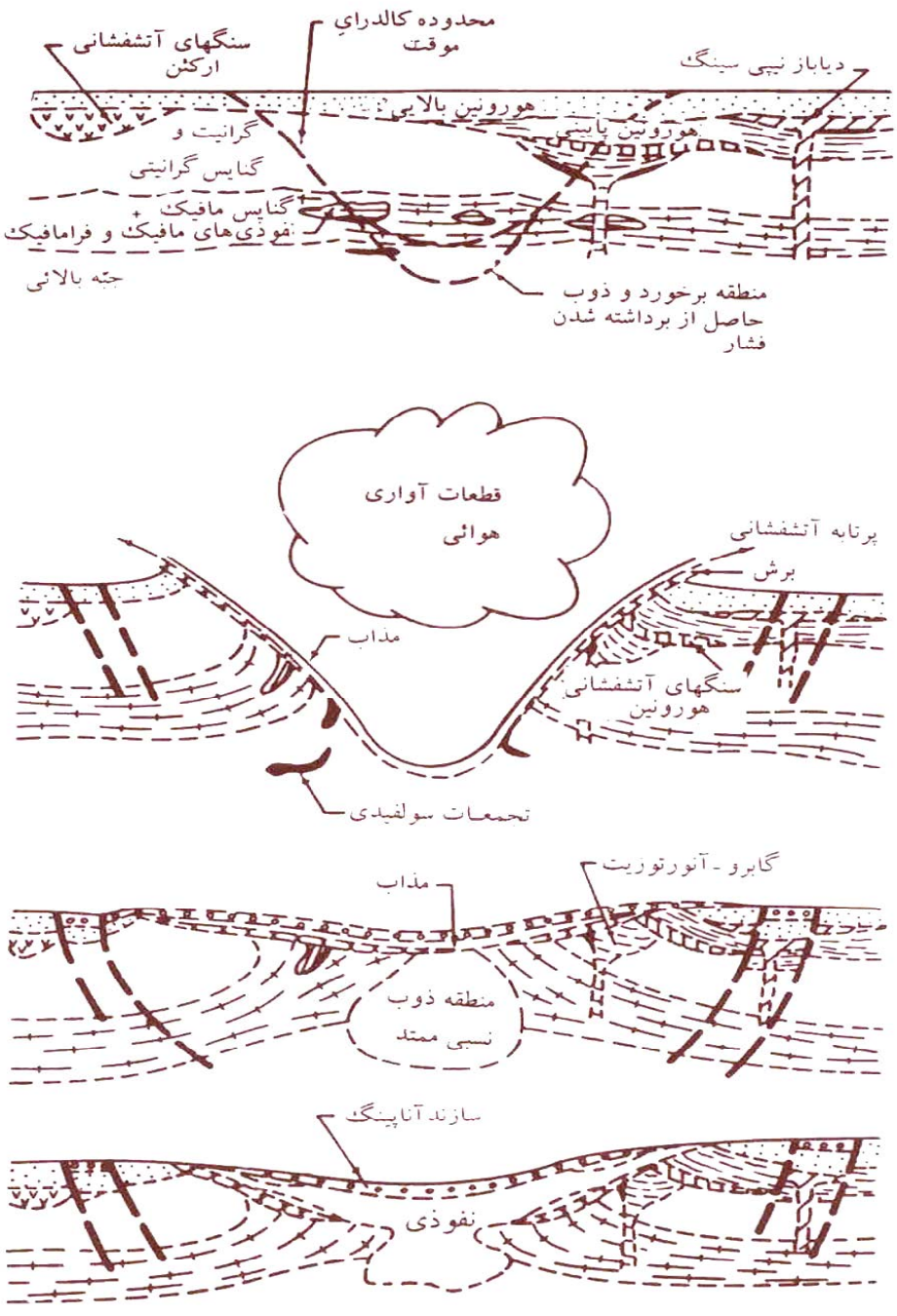
معدن سدبوری:

این کانسار در اونتاریوی کانادا واقع است و فرورفتگی آن دارای ابعاد ۶۰ ×۳۰ کیلومتر است که بصورت یک لوپولیت قیفی شکل در زیر رسوبات گروه وایت واترز و در بالای یک پی سنگ قدیمی قرار گرفته است (شکل۱-۱-۴-۲). تودهٔ معدنی در مقطع بصورت یک مخروط واژگون است که نوک آن در عمق ۲۵ ـ ۱۰ کیلومتری قرار دارد.



شکل ۱-۱-٤-۲ ترسیمی از لوپولیت سدبوری (کانادا) (اسیرنف ۱۹۸۳ در مرجع [۸]): ۱) میکرویگماتیت ۲) کوارتز گابرو ۳) نوریت،کوارتز دیوریت ٤) ماسه‌سنگ‌های جلمزفورد ٥) سازند آنواتین ٦) سازند آن‌آپینگ ۷) گرانیت و گنیس ۸) سری‌های هورونیک ۹) دایک‌های دیابازی ۱۰) گسل‌ها ۱۱) کانسارهای سولفیدی مس ـ نیکل

لایه بندی موجود شامل اوژیت ـ نوریت منطقهٔ پایینی، کوارتز گابروی میانی و میکروپگماتیت است. در قسمت نوریتی یک گابروی غنی از ادخال و کانسنگ سولفیدی وجود دارد که علاوه بر نیکل، عناصر مس، کبالت، آهن، پلاتین و ۱۱ عنصر دیگر از آن بدست می آید. نظریهٔ غالب کنونی در مورد تشکیل این کانسار برخورد شهاب سنگ و در نتیجه ذوب سنگ ها در اثر برخورد است(شکل ۲-۱-۴-۲)[۲۴].



شکل ۲-۱-۴-۲ تشکیل کانسار سدبوری در منطقه برخورد یک شهابسنگ با زمین (نقل از پتی سون، ۱۹۷۹).

۲-۵ کانسارهای تیپ کویناو یا میشیگان

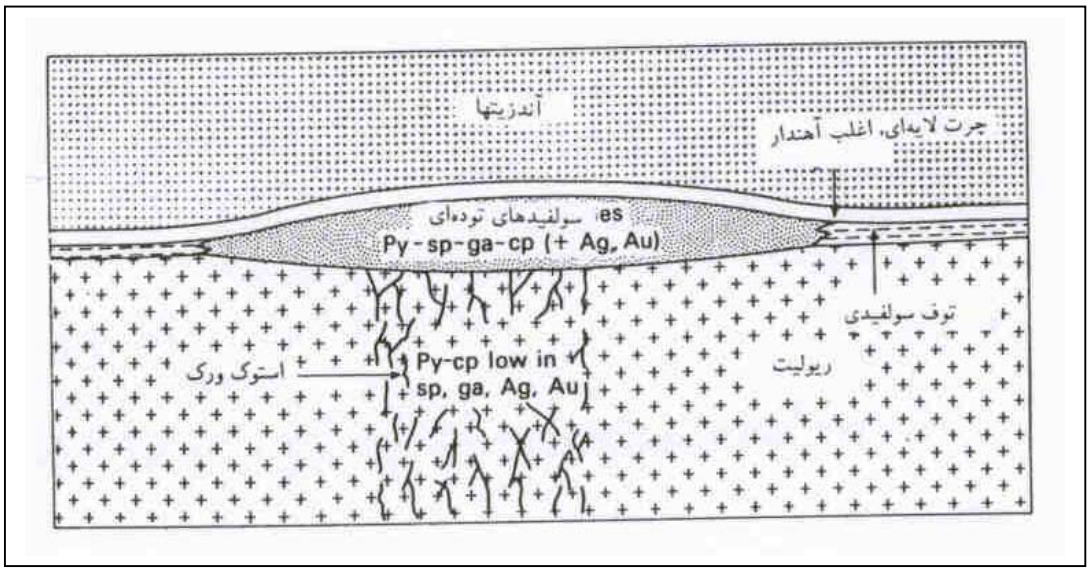
در این تیپ کانسار که در شبه جزیرهٔ کویناوی(میشیگان شمالی) به وفور یافت می شود، کانهٔ مس طبیعی، کانهٔ اصلی است و کالکوسیت و دیژنیت بطور فرعی حضور دارند. در این کانسار مادهٔ معدنی در درون سنگ های بازالت تولئیتی حفره دار و در لایه های کنگلومرا که بین فوران های بازالتی قرار دارند، پراکنده است. معمولا اندازه دانه های مس در حد میلیمتر است و رگه های حاوی آن توده را قطع می کند. مس همراه نقره بوده که نشان دهندهٔ پایین بودن فشار موثر گوگرد است. وجود کانی های کلریت، اپیدوت، پرهنیت، پومپلی ایت و زئولیت و غالب بودن کانسارسازی رگه ای بجای جانشینی، حاکی از شرایط فشار و درجه حرارت پایین است. در اثر دگرگونی درجهٔ پایین گدازه های بازالتی، مس و سایر مواد آزاد شده، درون حفرات قرار می گیرند. گفته می شود این کانسار معادل بیرونی کانسارهای مس پورفیری است[۲۴].

۲-۶ کانسار های مس تیپ سولفید توده ای و آتشفشان زاد(VMS(Volcanic Massive Sulfide))

۲-۶-۱ معرفی:

این نوع کانسار بعد از مس پورفیری در درجهٔ دوم اهمیت قرار دارد و از نظر ماهیت و مرفولوژی از نوع کانسارهای همساز(کانسار ها را می توان مانند پیکره های نفوذی آذرین بر اساس قرار گرفتن نسبت به نواربندی سنگ شناختی(اغلب لایه بندی) سنگ های دربرگیرنده، به توده های ناساز و همساز تقسیم کرد) با سنگ میزبان آتشفشانی است. همانطور که می دانید دو نوع ذخیره اصلی در سنگ های آتشفشانی یافت می شود که عبارت است از: ذخایر پرکننده حفره(Vesicular Filling Deposite) و ذخایر سولفید توده ای (Massive Sulfide Deposites). دسته اول اهمیت زیادی ندارد، اما نوع دوم گسترده بوده و از تولید کننده های مهم فلزهای پایه به حساب می آید. طلا و نقره نیز اغلب به صورت محصولات جانبی با این نوع کانسار همراه است. ذخایر سولفید توده ای همراه با سنگ های آتشفشانی، اغلب دارای بیش از ۹۰ درصد سولفید آهن، معمولا به صورت پیریت است، هر چند پیروتیت هم در بعضی ذخایر تشکیل می شود. این ذخایر عموما توده های چینه سان، عدسی شکل(Lenticular) یا ورقه مانند(Sheetlike) (شکل ۱-۱-۶-۲)هستند که در همبری بین واحدهای آتشفشانی یا در همبری واحدهای آتشفشانی ـ رسوبی تشکیل می شوند. با افزایش مقدار مگنتیت، این کانسنگ ها به کانسنگ های اکسید توده ای مگنتیت و یا هماتیت تبدیل می شوند، مانند ساویج ریور (Savage River) در تاسمانی، فوسدالن(Fosdalen) در نروژ و کیرونا (Kiruna) در سوئد.

ذخایر سولفید توده ای بیشتر به صورت گروهی و در هر منطقه در یک یا تعداد محدودی از افق های موجود در توالی مربوطه یافت می شود. این افق ها ممکن است نمایانگر تغییر ترکیب سنگ های آتشفشانی یا تغییری از ولکانیسم به رسوبگذاری بوده یا به طور ساده توقفی در ولکانیسم را نشان دهد. رابطه تنگاتنگی میان کانسارها و سنگ های آذرآواری وجود دارد و بسیاری از کانسارها بر روی محصولات انفجاری گنبدهای ریولیتی قرار دارد. این ذخایر معمولا روی یک استوک ورک که خود نیز ممکن است دارای عیار معدنی باشد، قرار می گیرد. استوک ورک را می توان کانال تغذیه کننده ای در نظر گرفت که سیال های کانه زا از راه آن نفوذ کرده و کانسار سولفید توده ای بالای آن را بوجود آورده اند.



شکل ۱-۱-۶-۲ نیمرخ عرضی شماتیک یک کانسار سولفید توده ای همراه با سنگ های آتشفشانی که نشاندهندهٔ استوک ورک تغذیه کننده واقع در زیر، و کانی های شاخص آن است. Py= پیریت ،sp= اسفالریت ، gn= گالن، cp= کالکوپیریت[۸]

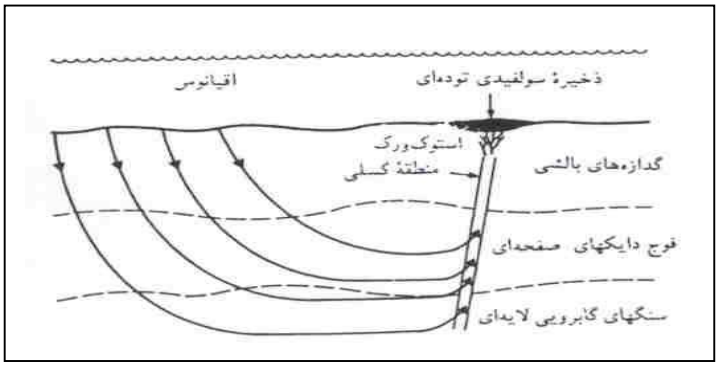
این کانسار به سیستم های گرمابی زیردریایی وابسته بوده و بیشتر همراه با سنگ های آتشفشانی و دیگر سنگهای رسوبی از قبیل شیل و گری وک یافت می شود. بعضی در امتداد پشته های میان اقیانوسی و بعضی در حوضه های پشت قوسی در حال گسترش (تیپ قبرس)، بعضی در جزایر قوسی یا حاشیهٔ قاره ای (ژاپن)، تعدادی در آتشفشانهای جزیره ای درون ورقی و عده ای نیز در محیطهای زمینساختی ناشناخته مربوط به کمربندهای گرین استون آرکئن یافت می شوند. این کانسارها از نظر سنی محدودیت ندارند، مثلا کانسار پیلبارابلوک استرالیا ۳/۵ میلیارد سال قدمت دارد[۲۴]. این کانسارها در مراحل آخر فعالیت آتشفشانی تشکیل شده و ساختارهای رسوبی مانند دانه بندی تدریجی و چینه بندی متقاطع نیز در آنها دیده می شود. مرز بالایی آنها واضح، ولی مرز آنها با رسوبات فلزدار تدریجی است. ترکیب ونوع محلول های گرمابی متغیر بوده که وابسته به میزان اختلاط با آب دریا است[۲۵].

۲-۶-۲ منشاء:

این گونه ذخایر اغلب رابطه مکانی نزدیکی با سنگ های آتشفشانی نشان می دهند، اما این مطلب در مورد همه ذخایر مانند سولیوان (Sullivan) کانادا صدق نمی کند. کانسار سولیوان، کانساری با میزبان رسوبی است که همراه با مثال های مشابه تحت عنوان ذخایر سدکس(Sedex) (رسوبی ـ بروندمی) شناخته می شود. این ذخایر، همساز و غالبا نواری هستند و معمولا در انواع همراه با سنگ های آتشفشانی، سازندهٔ اصلی آنها پیریت است و همراه با آن مقادیر متغیری مس، سرب، روی و باریت دیده می شود. فلزهای قیمتی همراه با کانی های دیگر نیز ممکن است وجود داشته باشد. ذخایری از این نوع در حین تشکیل از مجراهای گرمابی (دودکش های سیاه (Black Smoker)) در چندین نقطه از مراکز گسترش بستر اقیانوس مشاهده شده است. در این جا به این ذخایر، ذخایر سولفید توده ای همراه با مواد آتشفشانی(یا آتشفشان زاد(Volcanogenic)) گفته

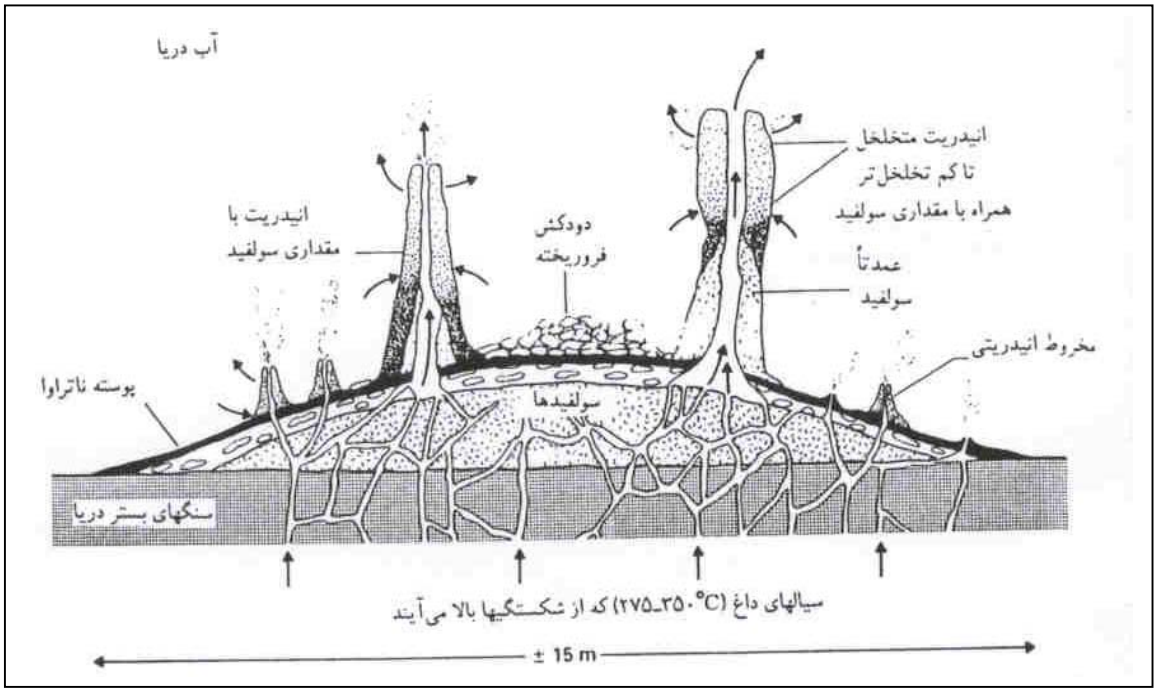
می شود. ذخایر دارای گرایش آتشفشانی، انواع مختلف دارند. هنگامی که با مواد آتشفشانی بازیک که به شکل افیولیت هستند و احتمالا در پشته های گسترش اقیانوسی(Oceanic spreading ridges) یا پشته های گسترش پشت کمانی(Back-arc spreading Ridges) تشکیل شده اند، همراه باشند، ذخایر تیپ قبرس (Cyprus Type Deposits) را می توان یافت. ذخایر تیپ قبرس عمدتا توده های پیریتی مس دار است[۸].

ذخایر تیپ بشی(Besshi-type deposits) با توالی های آتشفشانی مافیک و در خاستگاه های پیچیده ساختاری با توالی های ضخیمی از گری وک یافت می شود. این ذخایر اغلب دارای مس و روی است. ذخایر تیپ کوروکو (Kuroko)، که از ذخایری به همین نام در ژاپن مربوط به دوره میوسن، نام گرفته است با مواد آتشفشانی فلسیک همراه بوده و دارای مس، روی و سرب و اغلب مقداری طلا و نقره هستند. همچنین مقادیر زیادی باریت، ژیپس و کوارتز نیز ممکن است همراه با آنها یافت شود. امروزه توافق وسیعی مبنی بر منشا گرمابی زیردریایی این ذخایر وجود دارد، اما همان گونه که در شکل۱-۲-۶-۲ نشان داده شده است، در این مورد که آیا محلول های مسؤول تشکیل آنها منشا ماگمایی دارند یا آبهای دریایی در حال چرخش هستند، اختلاف نظر وجود دارد[۸].



شکل۱- ۲-۶-۲ چرخش آب دریا در پوستهٔ اقیانوسی، ممکن است منجر به تشکیل یک نهشتهٔ سولفید توده ای برونديمی همراه با سنگ های آتشفشانی شود[۸].

دودکش های سیاه در اواخر دهه ۱۹۷۰ در حین پژوهش های بستر اقیانوس به وسیله یک زیردریایی، کشف شدند. دودکش های سیاه پلوم هایی(plume) از سیال گرمابی داغ و سیاه، یا گاهی سفید است که از دهانه های دودکش مانندی که به شکستگی های بستر دریا وصل است خارج می شود. دودهای سیاه به دلیل مقدار زیاد ذرات سولفیدی فلزی ریزدانه و دودهای سفید به دلیل سولفات های کلسیم و باریم به این رنگ پدیدار می شود. ارتفاع دودکش ها معمولا کمتر از ۶ متر و عرض آنها حدود ۲ متر است و بر روی برآمدگی هایی(Mound) از سولفیدهای توده ای با عیاری در حد کانسنگ قرار دارند(شکل۲-۲-۶-۲). که درون گرابن ها و بر روی یال پشته های اقیانوسی واقعند. کانی شناسی برآمدگی ها، به ذخایر سولفیدی توده ای خشکی شبیه است که در آنها سولفیدهای مس ـ آهن دما بالا در زیر سولفیدهای غنی از روی و آهن، باریت و سیلیس آریخت دما پایین قرار دارند. مقداری طلا و نقره نیز یافت شده است[۸].



شکل ۲-۲-۶-۲ تشکیل دودکش ها و برآمدگی های سولفیدی بستر دریا[۸]

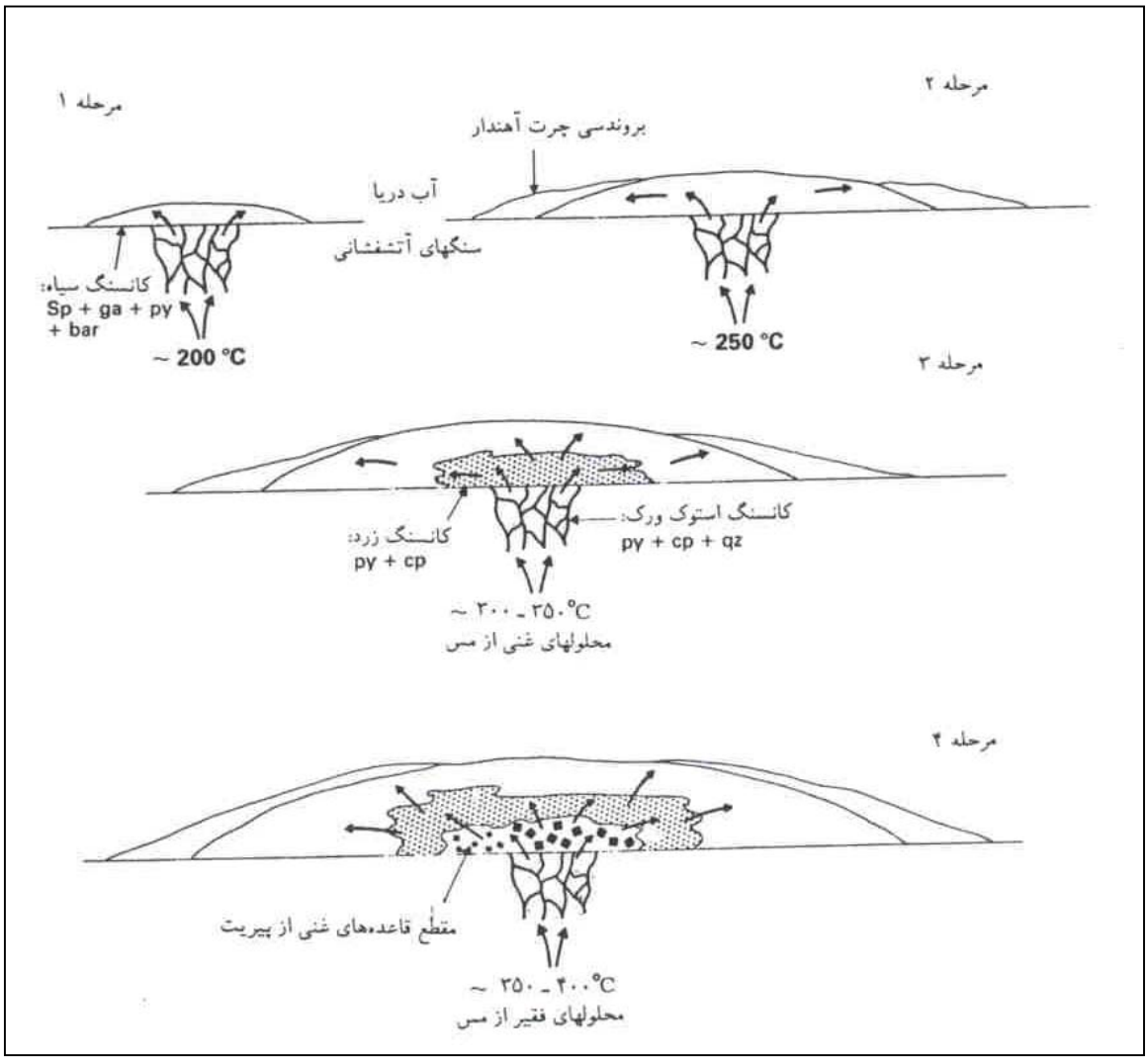
دودکش ها پس از رشد صعودی با آهنگ حدود ۸-۳۰ سانتی متر در روز، در نهایت ناپایدار شده و فرو می‌ریزند و برآمدگی ای از واریزه های دودکش، درآمیخته با انیدریت و سولفیدها را به وجود می آورد که دودکش بعدی بر روی آن رشد کرده و فرو می ریزد. وقتی یک برآمدگی به وجود آمد، هم از طریق تجمع واریزه های دودکش بر سطح بالایی آن، و هم به وسیله ته نشینی سولفیدها در برآمدگی رشد می کند. پوشیده شدن به وسیله واریزه های دودکش، و ته نشینی سولفید و سیلیس در بخش بیرونی برآمدگی، باعث کاهش تراوایی برآمدگی شده و پوسته ای را به وجود می آورد که خروج سیال را محدود کرده و باعث چرخش قابل توجه محلول های دما بالا در برآمدگی می شود. سپس منحنی های همدما در برآمدگی بالا رفته و منجر به جانشینی مجموعه کانی های دما بالا به جای مجموعه دما پایین می شود. بنابراین یک منطقه بندی ذخایر سولفید توده ای همراه با سنگ های آتشفشانی(volcanic associated massive sulphide deposits) یافت شده بر روی خشکی به وجود می آورد. مدل تشکیل آنها در شکل۳-۲-۶-۲ ارائه شده است. گام های اصلی توسعه این مدل به شرح زیر است:

۱ـ ته نشینی اسفالریت، پیریت، تتراهدریت، باریت همراه با کمی کلکوپیریت(کانسنگ سیاه) از طریق مخلوط شدن محلول های گرمابی نسبتا سرد(تقریبا۲۰۰ درجه سانتی گراد) با آب سرد دریا.

۲ـ تبلور دوباره و رشد دانه های این کانی ها در قاعده برآمدگی در حال رشد از طریق محلول های داغتر(۲۵۰ درجه سانتیگراد) همراه با رسوبگذاری بیشتر اسفالریت.

۳ـ ورود محلول های غنی از مس داغتر(تقریبا۳۰۰ درجه سانتیگراد) که در بخش پایین نهشته، کلکوپیریت را جایگزین کانی های قبلی می کند(کانسنگ زرد). رسوب گذاری مجدد کانی های جایگزین شده در سطحی بالاتر.

۴ـ سپس محلول های باز هم داغتر اشباع از مس، مقداری کلکوپیریت را حل کرده و قاعده ای غنی از پیریت در ذخایر به وجود می آورد.

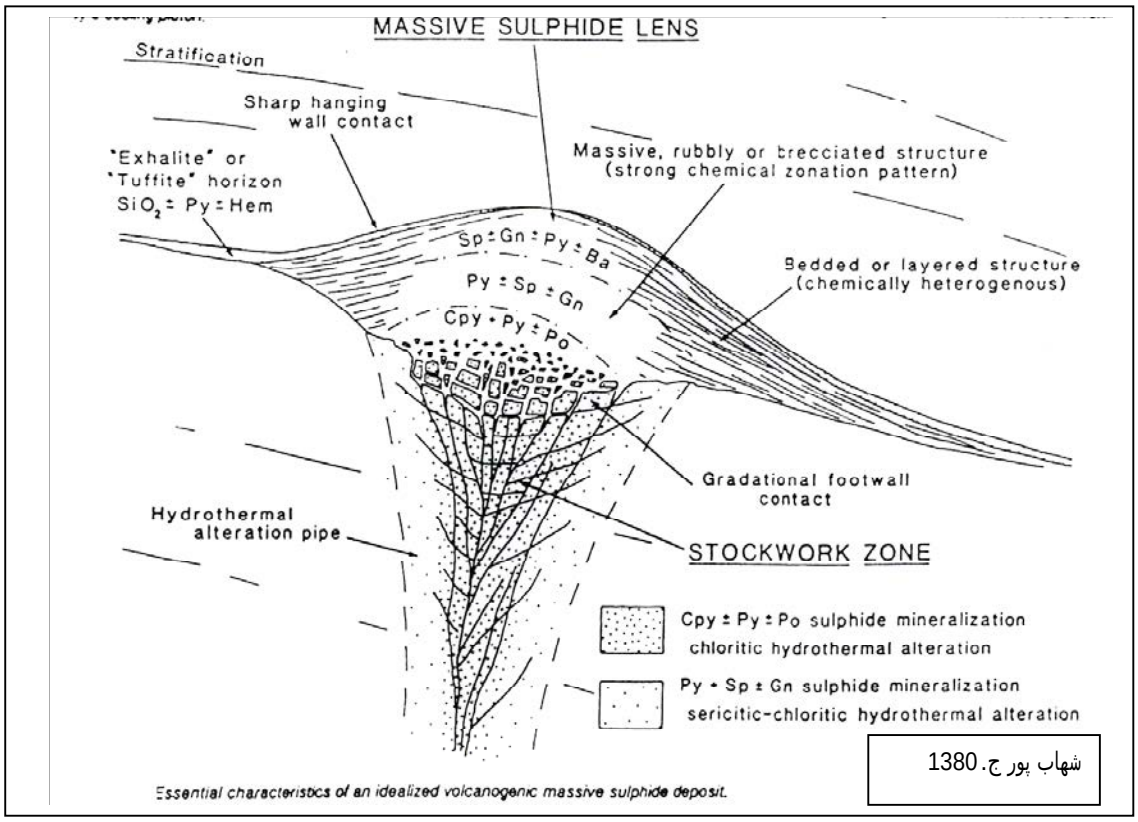


شکل ۳-۲-۶-۲ نمودارهای چهارگام اول تشکیل ذخایر توده ای همراه با سنگ های آتشفشانی، به شرحی که در متن آمده است، bar = باریت، cp = کالکوپیریت, ga =گالن، Py= پیریت، qz = کوارتز، sp = اسفالریت [۸].

۵ـ رسوبگذاری بروندمی های چرت ـ هماتیت بالا و پیرامون نهشته سولفیدی. بروندمی های مشابهی نیز در گام های پیشین به وجود آمده است. ته نشینی سیلیس کند است و برای هسته بندی نیاز به کانی های سیلیکاتی دارد، بنابراین اگرچه ممکن است مقدار زیادی از آن در استوک ورک زیرین نهشته شود، اما بقیه آن از توده سولفیدی خارج شده و در بالای آن بروندمی ها را می سازد.

رشد لوله یا دودکش سولفیدی توسط فرایندهای ته نشینی انیدریت بصورت لوله بین سیالات گرمابی در حال صعود و آبهای فرورو دریا آغاز می شود(شکل ۴-۲-۶-۲). در اثر تغییرات فیزیکوشیمیایی، کانی های سولفیدی در درون پرزهای استوانهٔ انیدریتی ته نشین می شود بنحوی که با افزایش طول لوله بخش پایینی لوله نیز ضخیم

می شود. دودکشهای بالغ دارای ساخت منطقه ای متحدالمرکز هستند. این فرایند بسیار ناکارآمد است و ۹۹٪ فلزات با سیالات گرمابی به درون آب دریا رها شده و در رسوبات دریایی دوردست (تا ۷۵۰ کیلومتر) نهشته می شوند. در مورد سیستم های گرمابی سه نظریه وجود دارد. ۱- الگوی چرخشی. ۲- مدل آب گرمابی ماگمایی. ۳- مدل آب سازندی[۲۵].



شکل ۴-۲-۶-۲ خصوصیات ضروری یک کانسار آتشفشان زاد سولفید توده ای[۲۴].

مهمترین کانه های سولفیدی موجود در عدسی های سولفیدی عبارتند از پیریت، پیروتین، کالکوپیریت، اسفالریت، گالن[۲۴].

۳-۶-۲ اندازه، عیار، کانی شناسی و بافت:

بیشتر ذخایر جهان کوچک و حدود ۸۰ درصد کل ذخایر شناخته شده در محدوده ۰٫۱ تا ۱۰ میلیون تن قرار می گیرد. از این میان، حدود نیمی از نهشته ها، ذخیره ای کمتر از ۱ میلیون تن دارند. مقدار میانگین برای این تیپ، این واقعیت را پنهان می کند که این نهشته ها می توانند بسیار بزرگ یا غنی و استخراج آنها بسیار سودآورد باشد. مثال هایی از اینگونه نهشته ها در جدول ۳-۶-۲ ارائه شده است. کانی شناسی این نهشته ها نسبتا ساده و اغلب شامل بیش از ۹۰ درصد سولفید آهن و معمولا به صورت پیریت است که البته پیروتیت نیز در برخی نهشته ها وجود دارد. کالکوپیریت، اسفالریت و گالن ممکن است بسته به رده نهشته، اجزای اصلی تشکیل دهنده باشد؛ برنیت و کالکوپیریت گاهی حائز اهمیت بوده و آرسنوپیریت، مگنتیت و تتراهدریت ـ تنانتیت نیز ممکن است در مقادیر اندک موجود باشد. با افزایش مقدار مگنتیت، این نهشته ها به کانسنگ های اکسید توده ای(massive oxide ore) تبدیل می شوند. کانی باطله اساسا کوارتز است اما گاهی کربنات نیز

تشکیل شده و کلریت و سریسیت نیز ممکن است به طور محلی اهمیت یابد. کانی شناسی این نهشته ها چگالی بالایی داشته و برخی از آنها مانند آلخوسترآل(Aljustreal) و نووس ـ کوروو(Neves-Corvo) در پرتغال، نابهنجاری های گرانشی بارزی ایجاد می کند که اهمیت اکتشافی زیادی دارد.

ذخایرمعدنی + استخراج‌شده	(Mt)	Cu%	Zn%	Pb%	Sn%	Cd%	Ag gt^{-1}	Au gt^{-1}
کیدکریک، انتاریو	۱۵۵/۴	۲/۴۶	۶/۰	۰/۲	r^{+}_{+}	r	۶۳	–
هورن، کبک	۶۱/۳	۲/۱۸	–	–	–	–	–	۴/۶
رُزبری، تاسمانی	۱۹/۰	۰/۸	۱۵/۷	۴/۹	–	–	۱۳۲	۳/۰
هرکولس، تاسمانی	۲/۳	۰/۴	۱۷/۸	۵/۷	–	–	۱۷۹	۲/۹
ریوتینتو، اسپانیا*	۵۰۰	۱/۶	۲/۰	۱/۰	–	–	r	r
آزال‌کولار، اسپانیا	۴۵	۰/۴۴	۳/۳۳	۱/۷۷	–	–	۶۷	۱/۰
نووس‌کوروو	۳۰/۳	۷/۸۱	۱/۳۳	–	–	–	–	–
(پرتغال)	۲/۸	۱۳/۴۲	۱/۳۵	–	۲/۵۷	–	–	–
	۳۲/۶	۰/۴۶	۵/۷۲	۱/۱۳	–	–	–	–

جدول ۳-۶-۲ عیار و ذخیره برخی از نهشته های بزرگ و پرعیار سولفیدهای توده ای آتشفشانی

*ریوتینتو، که در آغاز یک ورقه چینه سان منفرد بوده است، به صورت یک تاقدیس چین خورده، تاج آن رخنمون یافته و حجم عظیمی از آن به گوسان تبدیل شده است. مقدار فلزات پایه، برای مقطع ۱۲ میلیون تنی سان آنتونیو است. سه کانسار آخر، سه نوع کانسنگ را مشخص می کند و توده های معدنی خاص (که توده های معدنی ۴ عدد است) نقره در برخی مقاطع وجود دارد r^{+} نشاندهنده این است که این فلز بازیافتی است، اما عیار میانگین در دسترس نیست[۸].

بیشتر نهشته های سولفید توده ای، دارای منطقه بندی هستند. گالن و اسفالریت در نیمه بالایی کانسارها فراوانتر است در حالی که مقدار کلکوپیریت به سمت کمر پایین، افزایش یافته و به سمت پایین به کانسنگ استوک ورک کلکوپیریت تبدیل می شود(شکل ۳-۲-۶-۲). این الگوی منطقه بندی، فقط در ذخایر چندفلزی (polymetallic)، به طور کامل توسعه می یابد.

بافت ها بر اساس درجه تبلور تغییر می کند. بافت های اولیه غالب، شامل نواربندی کلوفرم سولفیدها، همراه با توسعه زیاد پیریت فرامبویدال(Framboidal) احتمالا نشانگر رسوبگذاری کلوییدی است. اما تبلور دوباره ناشی از مقداری دگرگونی، نواربندی کلوفرم را تخریب کرده و یک کانسنگ دانه ای به وجود آورده است. این کانسنگ ممکن است در مقطع غنی از روی نواربندی نشان دهد، اما کانسنگ های کلکوپیریتی به ندرت نواری اند. میانبارهای زاویه دار سنگ های میزبان آتشفشانی نیز گاهی موجود است و ساختارهای رسوبات نرم (فروریزش، قالب‌های وزنی) نیز گاهی دیده می شود. لایه بندی نیز از برخی نهشته ها گزارش شده است.

۲-۶-۴ دگرسانی سنگ دیواره:

دگرسانی سنگ دیواره معمولا به سنگ های کمرپایین محدود می شود. کلریتی شدن و سریسیتی شدن رایج ترین دگرسانی هاست. منطقه دگرسانی لوله ای شکل بوده و در درون و به سمت مرکز، حاوی استوک ورک کلکوپیریت دار است. قطر لوله دگرسانی به سمت بالا افزایش می یابد تا بر کانسنگ توده ای منطبق شود.

۲-۶-۵ رده بندی:

تقسیم بندی ژئو شیمیایی این ذخایر به ذخایر آهن، آهن ـ مس ـ روی و آهن ـ مس ـ روی ـ سرب، پیش از این مورد بحث قرار گرفت(بخش۱-۶-۲ و۲-۶-۲)، اما باید تاکید کرد در حالی که ممکن است نهشته هایی از پیریت بدون مقادیر قابل توجه مس یافت شود، مس هرگز به تنهایی نهشته ای نساخته است. به همین ترتیب در صورت یافتن سرب، روی و دست کم مقدار ناچیزی مس نیز وجود خواهد داشت. همراه با روی، مس و احتمالا سرب نیز وجود دارد. با رهیافتی متفاوت از رهیافت ساده شیمیایی، می توان نشان داد که در واقع دو گروه اصلی وجود دارد: Cu-Zn و Zn-Pb-Cu در واقع، تعداد کمی نهشته به اصطلاح مس و فاقد روی وجود دارد.

برخی از نام هایی که معمولا به این انواع مختلف داده می شود در بخش ۲-۵-۲ ذکر شد. اگرچه سال ها، بسیاری از محققان نهشته های آهن ـ مس ـ روی آرکئن کانادا را گونه ای از انواع کوروکو می دانستند اما امروزه معمولا توافق بر این است که بهتر است آنها را به عنوان دسته ای مجزا در نظر گرفت که به آنها نام اولیه(primitive) می دهند. خلاصه ای از ماهیت انواع مختلف کانسارهای VMS در جدول ۲-۶-۵ ارائه شده است. جالب توجه است که از برخی از این نهشته ها فلزات قیمتی استخراج می شود؛ در واقع در برخی از نهشته های تیپ اولیه کانادا، فلزات قیمتی محصول اصلی به شمار می روند. از نهشته های تیپ بشی(Besshi type deposits) و کورو ممکن است نقره و طلا تولید شود، در حالی که در نهشته تیپ قبرس طلا می تواند محصول جنبی باشد.

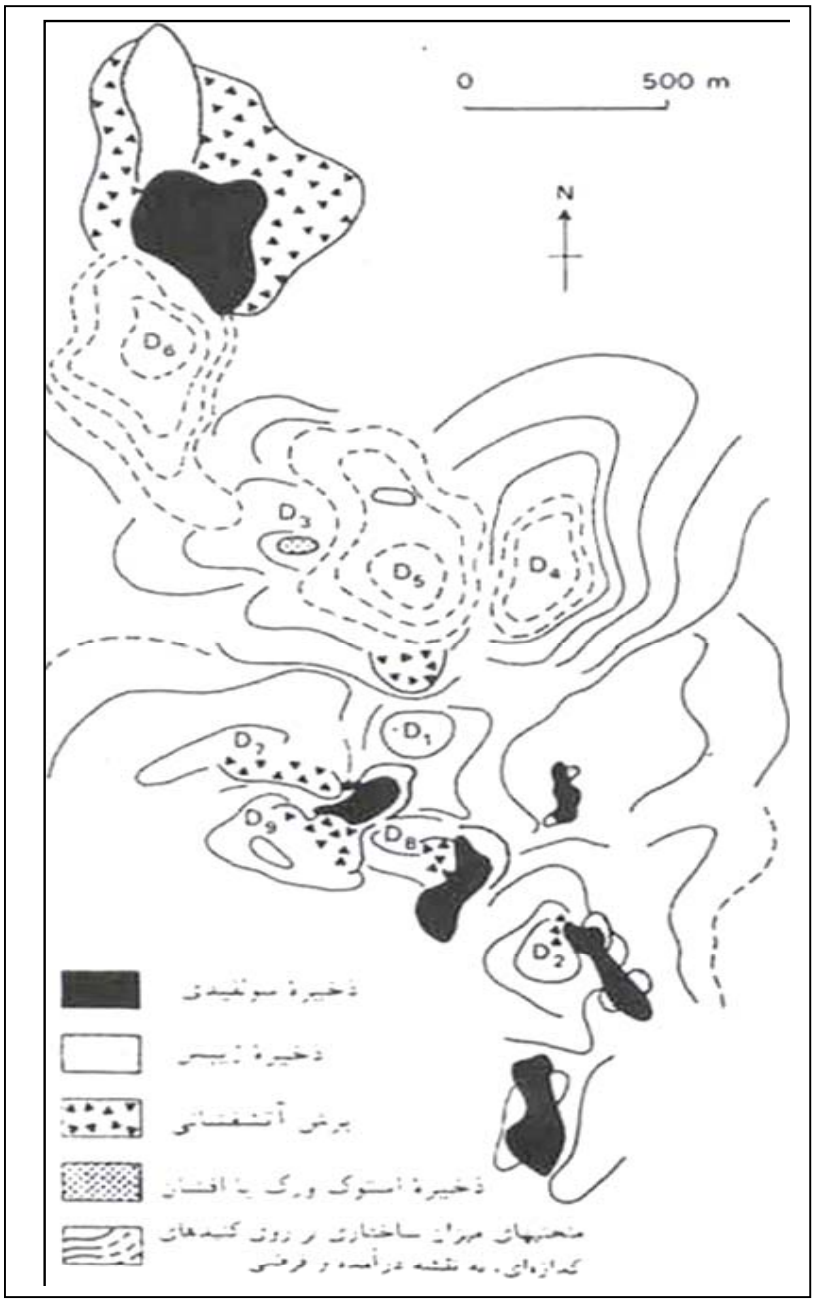
نوع	سنگهای آتشفشانی همراه	سنگهای رسوبی آواری	محیط رسوبگذاری	خاستگاه تکتونیکی	محدودهٔ سنی شناخته‌شده
بشی Cu-Zn±Au±Ag	بازالتهای درون‌صفحه‌ای	گری‌وک‌ودیگر توربیدیتهای ناشی از قاره	دریایی عمیق همراه‌آتشفشانی بازالتی	برقاره‌ای یا کافتش پشت‌کمانی	پروتروزوییک آغازین، پالئوزوییک
قبرس Cu(±Zn)±Ag	مجموعهٔ‌افیولیتی، بازالت‌تولئیتی	کم یا صفر	دریایی عمیق همراه‌آتشفشانی تولئیتی	کافتش‌اقیانوسی درمرزهای‌سازنده	فانروزوییک
کوروکو Cu-Zn-Pb ±Au±Ag	مجموعه‌بایمودال، بازالت تولئیتی، گدازه‌کالک‌آلکالن و آذرآواری‌ها	آواری‌های عمق کم تا متوسط، اندکی کربنات	آتشفشانی انفجاری،دریایی کم‌عمق‌تاقاره‌ای	کافتش پشت کمانی، تشکیل کالدرا	پروتروزوییک آغازین، فانروزوییک
اولیه Cu-Zn±Au±Ag	مجموعه‌های کاملاً تفریق شده، گدازه‌ها و آذرآواری‌های بازالتی‌تا ریولیتی	گری وک‌های نابالغ، شیلها، ماسه سنگها	دریایی، عمق کمتر از ۱km، عمدتاًدرکمربند-های گرینستون	بسیارمشکوک، فرونشست‌زیاد، گودالهای‌محصور به‌گسل،حوضه-های‌پشت‌کمانی؟	آرکئن - پروتروزوییک آغازین

جدول ۵-۶-۲ تیپ های ذخایر سولفید توده ای همراه با آتشفشانی[۸].

۶-۶-۲ برخی سیماهای مهم رخداد صحرایی:

(الف) همراهی با گنبدهای آتشفشانی: پیش از این نیز همراهی نزدیک این نهشته ها با گنبدهای آتشفشانی در مراجع مورد توجه قرار گرفته است. نهشته های کوروکو ناحیه کوزاکا در ژاپن یک نمونه خوب است (شکل۱-۶-۵-۲)، مثال های زیادی از مناطق دیگر، مانند ناحیه نوراندا در کبک نیز گزارش شده و برخی مؤلفان ارتباطی ژنتیکی را ذکر می کنند. در هر حال برخی پژوهشگران ژاپنی بر این باورند که تمامی نهشته های کوروکو در گودی ها تشکیل می شوند و گنبدها پس از آنها رخ داده و بسیاری از نهشته های سولفید توده ای را بالا آورده اند. در مناطقی مانند ناحیه آمبلر(Ambler) شمال آلاسکا، هیچ همراهی نزدیکی بین گنبدهای ریولیتی و نهشته ها وجود ندارد[۸].

(ب) توسعه خوشه ها(Cluster)(ناحیه های معدنی): اگرچه نهشته های کوروکو در ژاپن در راستایی به طول ۸۰۰ کیلومتر یافت شده و بیش از ۱۰۰ رخداد شناخته شده در این فاصله وجود دارد، اما این نهشته ها به صورت خوشه هایی از ۸ یا ۹ منطقه معدنی قرار گرفته اند. بین این مناطق سنگ های مشابه، فقط تعداد کمی نهشته مجزا وجود داشته و این یک حالت موردی با چند استثنای قابل توجه در رخدادهای سولفید توده ای تمام سن های زمین شناسی است[۸].



شکل ۱-۶-۶-۲ توزیع گنبدهای گدازهٔ داسیتی و نهشته های کروکو، منطقهٔ کوزاکا ژاپن[۸]

(ج) افق های مناسب: ذخایر هر خوشه معدنی اغلب در یک فاصله چینه شناختی محدود یافت می شوند. این محدوده در تیپ های اولیه و کوروکو در بالای مرحله فلسیک فعالیت آتشفشانی چرخه ای، بایمودال، کالک آلکالن مرتبط با محفظه های ماگمایی کم عمق به جای یک نوع سنگ فلسیک خاص است. گاه میزبان این افق نامناسب، سنگ های آتشفشانی نسبتا نازک است، مانند کمربند پیریت ایبریا که در آن کمپلکس آتشفشانی ـ رسوبی واقع در زیر کانسارهای بی شمار این ناحیه، فقط ۵۰ تا ۸۰۰ متر ضخامت دارد. کانه زایی کوروکو در ژاپن و آتشفشانی همراه، در دوره محدودی از میوسن میانی در ناحیه آتشفشانی توف سبز رخ داده است[۸].

(د) چینه شناسی نهشته: پیش از این نشان داده شد که ذخایر سولفید توده ای، منطقه بندی یا لایه بندی کاملی دارند. ذخایر کوروکو دارای بهترین و پیوسته ترین توالی چینه شناختی کانسنگ و انواع سنگ هستند. یک کانسنگ مطلوب دارای این واحدهاست(شکل۲-۶-۶-۲).

۱ـ کمر بالا: مواد آتشفشانی بالایی و / یا سازند رسوبی؛

۲ـ منطقه کوارتز آهن دار: عمدتا هماتیت و کوارتز (چرت)؛

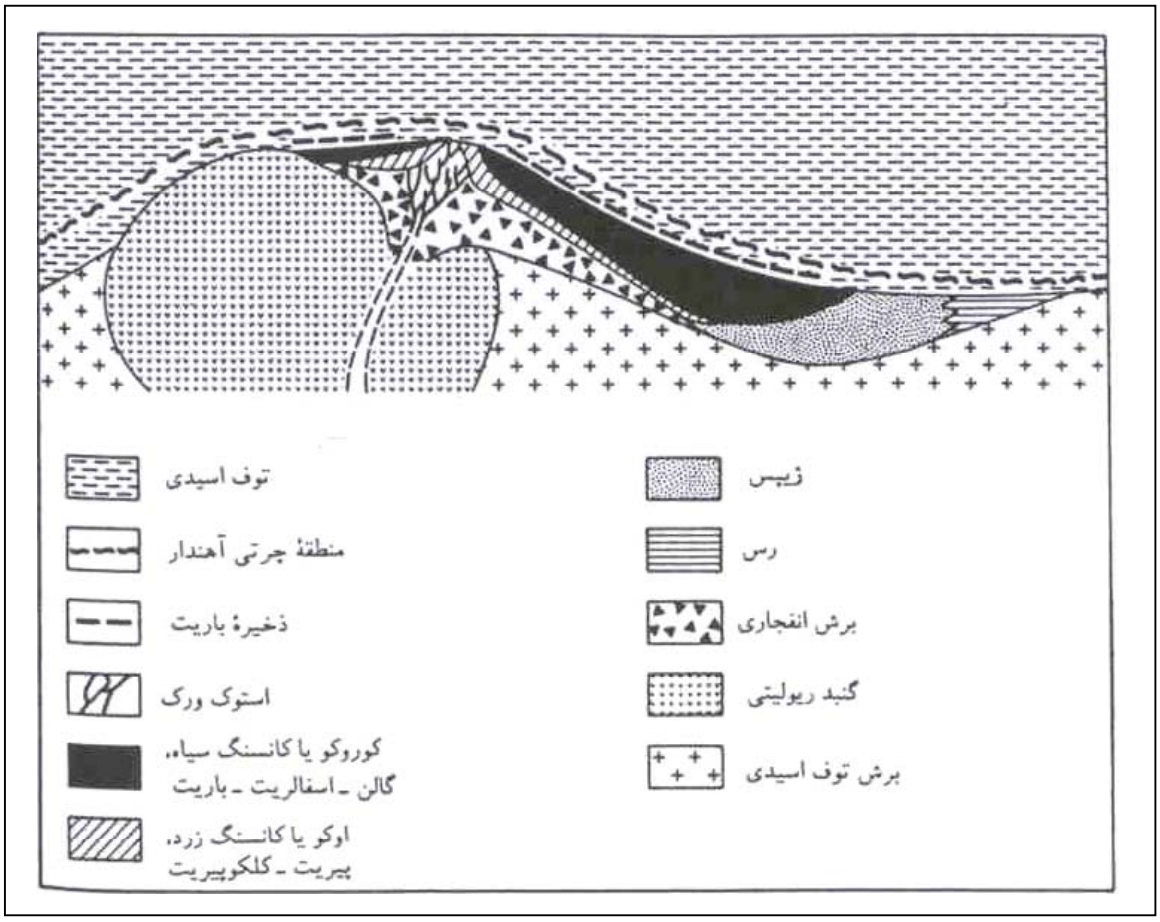
۳ـ منطقه کانسنگ باریت؛

۴ـ منطقه کوروکو یا کانسنگ سیاه: اسفالریت ـ گالین ـ باریت؛

۵ـ منطقه اوکو(Oko) یا کانسنگ زرد: کانسنگ های پیریت مس دار؛ تقریبا در همین افق، اما به سمت بخش های حاشیه ای ، ممکن است منطقه سکوکو(Sekkoko) حاوی انیدریت ـ ژیپس ـ پیریت دیده شود؛

۶ـ منطقه کی کو(Keiko) یا کانسنگ سیلیسی، کانسنگ افشان و یا استوک ورک مس دار، سیلیسی؛

۷ـ کمر پایین: ریولیت سیلیسی شده و سنگ های آذرآواری.



شکل ۲-۶-۶-۲ نیمرخ شماتیک از یک نهشتهٔ کوروکو[۸].

۷-۶-۲ مثالی از کانسارهای معروف مس سولفید توده ای آتشفشان زاد در دنیا:

- کانسار مس ـ روی قبرس:

این کانسار در تروودز(Troods) قبرس واقع است. نهشته های پیریت، کالکوپیریت و پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت قبرس را از نهشته های همراه با افیولیت ها می دانند. مس زایی در پلوتون اولترابازیک تروودز رخ داده است. این توده در پایان مزوزوئیک به هنگام عمیق شدن موقت اقیانوس تتیس، پیش از برخورد ورقه های اوراسیا و آفریقا، جایگزین شده است. عمیق ترین محل دریا در جنوب قبرس واقع است و آنومالی گرانی، مغناطیسی آن از وجود لیتوسفر اقیانوسی در آن مکان حکایت دارد. مجموعه های پلوتونیک، دایک های ورقه ای وگدازه های بالشتی در این منطقه وجود دارد. نهشته های مس در گدازه های بالشتی که زیر گدازه های بالایی قرار دارند، تشکیل شده است. شکل توده ها نامنظم، عدسی، باقلایی، آبراهه ای و کانالی است. کانه زایی عمده، پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت، دکاسیت، کوولیت و آیداسیت است. در قبرس حدود ۱۵ تودهٔ معدنی با ذخیره های بین ۱۵-۲۰ میلیون تا چند هزارتن شناخته شده است. عیار میانگین مس ۲/۵٪ بوده و سنگ میزبان بازالت آلبیتیزه یا اسپیلت است. آثار ذوب مس در قبرس ۶۰۰۰ سال قدمت دارد[۳۵].

- **کمربند آبیتیبی:** در کانادا واقع بوده و در سنگ های بازالتی و بازالت آندزیتی و طی مراحل اولیهٔ کوهزایی تشکیل شده اند(کمان های قوسی و حاشیه های فرورانش).

- **کورکو ژاپن:** در اثر فرایندهای آتشفشانی زیر دریایی تشکیل شده است و سیالات کانه زا از آبهای فسیل موجود در رسوبات حاصل شده است. این تیپ در مراحل دیرتر کوهزایی بوجود آمده و با نهشته های پورفیری مرتبط است. اعتقاد بر این است که ته نشست مواد معدنی در آبهای کم عمق و آرام حوضچه های کالدرا مانند مجراهایی که نزدیک به سطح آب دریا بوده و به اقیانوس راه داشته اند، منجر به تشکیل این کانسار شده است.

- **تیپ بسئی ژاپن**: از نوع مس ـ روی وابسته به حوضه های در حال گسترش پشت کمانی با سنگ میزبان تولئیتی می باشد.

- **تیپ سرب ـ روی ـ مس تاسمانی:** در سنگ های آتشفشانی و در گرابنی به عمق ۱۰ کیلومتر که از رسوبات فیلیشی پر شده است، ژنز آن گرمابی و به چرخش درآمدن آب دریا بر اثر پلوتون گرانیتی ذکر شده است[۳۵].

۲-۷ اسکارن های مس

۱-۷-۲ معرفی:

اسکارن یک واژه معدنی قدیمی سوئدی برای باطله است. اسکارن ها در دماهای بالا، در اثر افزوده شدن و جدا شدن مواد (متاسوماتیسم(metasomatism)) به وجود آمده اند. از نظر ماهیت و ریخت شناختی، از نوع کانسار های ناساز، پیکره های دارای شکل نامنظم و ذخایر جانشینی نامنظم (این ذخایر شکل بسیار نامنظمی دارند. زبانه هایی از کانسنگ ممکن است در طول هر ساخت صفحه ای موجود مانند لایه بندی، درزه ها، گسل ها و غیره دیده شود و توزیع آنها در هاله دگرگونی همبری، اغلب متغیر است. تغییرهای ساختاری ممکن است سبب قطع ناگهانی کانسار ها شود) می باشند. این ذخایر بیشتر در همبری توده های آذرین نفوذی و سنگ های دیواره کربناتی ایجاد می شوند. سنگ های آهکی در اثر دگرگونی همبری به مرمر، هورنفلس های کالک ـ سیلیکات و یا اسکارن تبدیل می شوند. اغلب اسکارن ها فاقد کانه زایی اقتصادی هستند.

کانی های کالک ـ سیلیکات مانند دیوپسید، آندرادیت و ولاستونیت که اغلب کانی های اصلی اسکارن های کانه دار به شمار می روند، شاهدی بر دمای بالا هستند و شواهد گوناگون محدوده ای از ۴۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد را برای تشکیل اسکارن اولیه نشان می دهد، اما در برخی اسکارن ها، بخصوص انواع روی ـ سرب، دمای پایین تری به دست آمده است.

اسکارن ها بر اساس کانی های غالب طبقه بندی می شوند: در صورتی که حاوی بخش مهمی از سیلیکات های Mg مانند فورستریت باشند به عنوان منیزیومی، و در صورتی که سیلیکات های کلسیم مانند آندرادیت و دیوپسید در آنها غالب باشد، کلسیمی گفته می شوند. بیشتر کانسارهای اقتصادی اسکارن جهان در اسکارن های کلسیمی یافت می شوند. ذخایر اسکارن معمولا بر اساس فلز یا کانی اقتصادی غالب موجود مانند مس، آهن، تنگستن، روی ـ سرب، مولیبدن، قلع و تالک نیز توصیف می شود. این ذخایر معمولا کوچکتر از بسیاری انواع ذخایر دیگر مانند مس های پورفیری، مولیبدن پور فیری و ذخایر سولفیدی سرب ـ روی با میزبان رسوبی هستند، اما منابع بسیار مهمی از تنگستن به شمار می روند. در برخی کشورها مانند قزاقستان، این ذخایر اهمیت شایان توجهی از نظر تولید آهن دارند. برخی ذخایر اسکارنی مس پربار، بویژه ذخایری با محصول فرعی طلا و یا نقره، در نقاط مختلف جهان در حال استخراج است و ذخایر بسیار بزرگی نیز ممکن است با ذخایر مس پورفیری از جمله توین بیوتس(Twin Buttes) آریزونا با ۵۰۰ میلیون کانسنگ با عیار ۰/۸ درصد مس، همراه باشد. ذخایر اسکارنی روی ـ سرب در تمام جهان یافت می شود، اما به ندرت ذخیره بالایی دارد. ذخایر اسکارنی مولیبدن و قلع در مقایسه با دیگر ذخایر این فلزات، اهمیت کمی دارند، به جز معدن سان آنتونیو(San Antonio Mine) در منطقه سانتا اولالیا(Santa Eulalia District) مکزیک[۸].

اکثر کانسارهای اسکارنی مس همراه با استوک های گرانودیوریتی تا کوارتز مونزونیتی کمربندهای کوه زایی حاشیهٔ قاره ای یافت می شوند و می توان آنها را به دو گروه تقسیم کرد.

۱- اسکارن های همراه با استوک های بی بر.

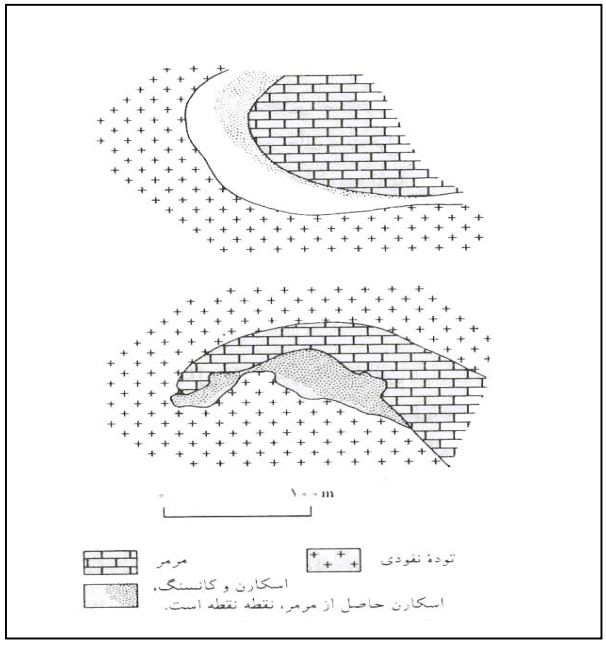
۲- اسکارن های وابسته به استوک های پورفیری.

نوع اول معمولا کوچکتر بوده و در ردهٔ ۵۰ – ۱ میلیون تن ذخیره قرار می گیرند. در نوع دوم دگرسانی نوع پتاسیک و فیلیک رخ داده و کانی سازی انتشاری و رگچه ای سولفید مس ـ آهن یافت می شود. شرایط آن معمولا اکسیدی است. در اسکارن های کلسیمی حضور کالکوپیریت، پیریت، منیتیت و آندرادیت در نزدیکی توده و بورنیت، کالکوپیریت، ولاستونیت به طرف مرمر نشان دهندهٔ کاهش آهن به سمت خارج است. اسکارن های منیزیمی مرتبط با کانسارهای مس پورفیری در شرایط محدودتری یافت می شوند[۲۴].

۲-۷-۲ مثالی از ذخایر اسکارنی:

- معدن مه مه، شمال هائیتی:

بین اسکارن ها و توده های نفوذی اغلب یک همبری کاملا تدریجی وجود دارد و معدن مس مه مه که در آن قطعه بزرگی از سنگ آهک کرتاسه به وسیله مونزوگرانیت احاطه شده، نمونه ای از این حالت است. کانه سازی پس از هضم ماگمایی گسترده که در حواشی سنگ آهک، مناطق سینودیوریتی و گرانودیوریتی ایجاد می کند، رخ می دهد. پس از تبلور ماگما، سنگ آهک و بخش هایی از توده نفوذی مجاور آن، به وسیله اسکارن جایگزین می شود. کانه زایی پس از تشکیل اسکارن صورت گرفته و به ترتیب پاراژنز هماتیت، مگنتیت، پیریت، مولیبدنیت، کالکوپیریت، برنیت، کلکوسیت و دیژنیت تشکیل می شود. این کانه زایی به صورت مناطق جایگزینی به وقوع پیوسته است. اسکارن اصلی و مکان تشکیل کانسنگ در همبری به صورت قطعه سنگ آهک است(شکل۱-۲-۷-۲). اسکارن در دمای ۴۸۰ تا ۶۴۰ درجهٔ سانتی گراد تشکیل می شود و وجود بافت های برون رستی نشانگر آن است که دمای کمینهٔ رسوبگذاری سولفید مس ـ آهن از ۳۵۰ درجه سانتی گراد فراتر بوده و جوانترین کانه ها در دمای حدود ۲۵۰ درجهٔ سانتی گراد متبلور شده اند. عیار کانسنگ در حدود ۲,۵ درصد مس است[۸].



شکل ۱-۲-۷-۲ نقشه زمین شناسی تراز ۴۵۷/۲ متری(بالا) و نیمرخی شرقی ـ غربی(زیر) از معدن مه مه در هائیتی. به تمرکز اسکارن در زیر مرمر توجه کنید[۸].